

3 成分 3 次元反射法地震探査データにおける 分散関係式を用いた P 波と S 波の平面波分解

岡野 豊*・三ヶ田 均**・尾西恭亮*³・後藤忠徳**

要 旨

本研究では、観測される弾性波を平面波分解することにより 3 成分 3 次元反射法地震探査データから P, SV, SH 波各々による信号を分離・抽出する手法を開発した。数値シミュレーションにより得られた合成データに本手法を適用した結果、元となる 3 成分記録から P, SV, SH 波各々による信号が分離・抽出されることが確認された。さらに、実際の 3 成分 3 次元陸上反射法地震探査データに本手法を適用した結果、P 波による信号の S/N 比が向上し、P-SV 変換波による信号を抽出することができた。数値シミュレーションデータ及び実記録に対する本手法の適用結果から、本手法が有用かつ実用的であると考えられる。

キーワード : P 波と S 波の分離・平面波分解・分散関係式・3 次元探査・3 成分記録

1. はじめに

近年の新規開発油田は、地質学的に複雑な場所に小規模なスケールで存在する油・ガス層など高度な探査技術を要する探鉱対象構造を扱うケースが増している。また、地下構造の形状だけではなく、炭化水素の胚胎と関係した物性情報の抽出が求められる傾向もあり、反射法地震探査をはじめとする弾性波探査技術の解析精度に対する要求はますます増加している。AVO 等の応用技術による物性情報の抽出に見られるように、S 波成分の取得は非常に重要である。このため、近年では海陸問わず、多成分受振器を用い、P 波に加え S 波信号を含む全波動場を取得した探査解析事例が報告されている (浅川ほか, 2006, 2007; Asakawa and Ward, 2007; 白石ほか, 2008)。また、PS 変換波の利用研究も進み (加野ほか, 2004; 白石ほか, 2008; 赤間・川中, 2009), S 波観測の要求は高まっている。しかしながら、例えば実体波成分のみであっても、P 波と S 波の重ね合わせで波動場が形成されている。従って、ジオフォンで取得された記録には P 波と S 波の信号が混在し、P 波信号が解析対象である

一般的な反射法探査の場合にも S 波がノイズとして振る舞うこととなる。一連のデータ処理過程において正確な地下構造および物性値を推定する際には、受振器で取得された記録から P 波と S 波の信号を分離し、各波動場を抽出する処理が S/N 比向上に有効であることはいうまでもない。

P 波と S 波の分離手法は、これまでいくつかの手法が研究されてきた。Devaney and Oristaglio (1986) は、F-K 領域における平面波分解により 2 次元 VSP (Vertical Seismic Profile) データを P 波と S 波に分離する手法を開発した。また、Al-anboori et al. (2005) は、 τ -p 領域で反射波の波数ベクトルを決定し、水平、鉛直の 2 成分受振記録のつくる変位ベクトルを座標変換することにより、2 次元反射法地震データを P 波と S 波に分離したが、その適用は 2 次元に留まっている。また、徳永ほか (2008) が簡潔に説明した通り、Wapenaar et al. (1990), Sun et al. (2004), Hovic and Amundsen (2005) らの研究では、3 成分×3 成分 (計 9 成分) のデータを必要とするか、SV 波と SH 波の区別をしていないなど、制約があり実用性に欠ける。徳永ほか (2008) では、Devaney

2010 年 6 月 23 日原稿受付; 2011 年 5 月 15 日受理

* 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂
(現在: 国際石油開発帝石株式会社
〒107-6332 東京都港区赤坂 5-3-1 赤坂 Biz タワー)

** 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂
*³ 秋田大学工学資源学部地球資源学科
〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1

第 120 回 (平成 21 年度春季) 学術講演会にて一部を発表

and Oristaglio (1986) の手法を適用し、3 成分 2 次元データを P, SV, SH の各波に分離する手法を開発した。しかしながら、その適用範囲を陸上の 2 次元探査に絞ったことから、波動場を分解する分散関係式は 2 次元のままである。こうした一連の研究では、通常実施される 3 次元探査への応用が未だなされていないのが現状である。3 次元探査において、3 次元波動場を扱う方法が必要である。

そこで本研究では、3 次元探査における 3 次元波動場を扱う P 波と S 波の分離方法の実用化を目指し、2 次元空間上で適用可能なように開発された Devaney and Oristaglio (1986) の手法を、3 次元反射法地震探査の記録に対して適用可能とするよう、3 次元に拡張した。まず本研究では、Devaney and Oristaglio (1986) の手法を発展させ、3 次元空間における分散関係式を用いて、入射方向に関わらず P 波と S 波を分離および抽出する手法とした。これにより、複雑な速度構造を伝達してきた一般的な 3 次元波動場を、P, SV, SH の各波に分離することが可能となる。必要な受振記録は、現在普及している探査装置で探査可能な一般的な 3 次元 3 成分反射法地震探査データであり、十分な適用性を有している。また、解析時に必要な情報は、地表面付近の P 波および S 波の速度のみであり、高い汎用性が期待できる。本論文では、はじめに、P 波と S 波の分離手法の理論を述べる。次に、波線理論に基づいて合成した 3 次元 3 成分データに適用し、提案手法の分離性能を評価する。さらに、実際の 3 次元 3 成分フィールドデータに適用し、本手法の有用性を検討する。

2. P 波と S 波の分離手法

本論文では、行列計算を扱うことから、ベクトルを行ベクトルで記載することとする。まず 3 次元デカルト空間において、水平方向を x, y 、鉛直方向を z とする。このような 3 次元空間における弾性波動場は次で表される。

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = (u_x(x, y, z, t) \quad u_y(x, y, z, t) \quad u_z(x, y, z, t))^T \quad (1)$$

ここで、 $u_x(x, y, z, t), u_y(x, y, z, t), u_z(x, y, z, t)$ はそれぞれ x, y, z 方向の波の変位、 t は時間、 $()^T$ は転置行列である。 $\mathbf{u}_p(x, y, z, t), \mathbf{u}_{sh}(x, y, z, t), \mathbf{u}_{sv}(x, y, z, t)$ をそれぞれ P 波、SH 波、SV 波による変位ベクトルとすると、 $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ は、それらの重ね合わせとして次のように表せる。

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \mathbf{u}_p(x, y, z, t) + \mathbf{u}_{sh}(x, y, z, t) + \mathbf{u}_{sv}(x, y, z, t) \quad (2)$$

平面波による波動場を考えると、 $\mathbf{u}_{sv}$ と $\mathbf{u}_{sh}$ が互いに直交し、同一波線で伝播すると仮定した場合、 $\mathbf{u}_p, \mathbf{u}_{sh}, \mathbf{u}_{sv}$ はスカラー変位ポテンシャル関数 $A_p(k_x, k_y, \omega), A_{sh}(k_x, k_y, \omega), A_{sv}(k_x, k_y, \omega)$ を用いて次のように表せる。

$$\mathbf{u}_p(x, y, z, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty dk_x \int_{-\infty}^\infty dk_y \times A_p(k_x, k_y, \omega) \mathbf{p} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{sh}(x, y, z, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty dk_x \int_{-\infty}^\infty dk_y \times A_{sh}(k_x, k_y, \omega) (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}}) e^{i(\mathbf{s} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{sv}(x, y, z, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty dk_x \int_{-\infty}^\infty dk_y \times A_{sv}(k_x, k_y, \omega) \left(\frac{\mathbf{s}}{|\mathbf{s}|} \times (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}}) \right) e^{i(\mathbf{s} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ は xyz 空間内の位置ベクトル、 ω は周波数、 k_x, k_y はそれぞれ x, y 方向の波数、 $\mathbf{p}, \mathbf{s}$ はそれぞれ平面 P 波、平面 SH 波の波数ベクトル、 $\hat{\mathbf{z}}$ は z 軸方向の単位ベクトルである。

さて、F-K 領域における波動方程式は、3 次元空間において次のように表される。

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{V^2} \quad (6)$$

$\mathbf{p}, \mathbf{s}$ は式(6)の関係式を満たすので、 $p_x, p_y, p_z, s_x, s_y, s_z$ をそれぞれ P 波、S 波 (SH 波、SV 波を含む) の x, y, z 方向の波数として、

$$\mathbf{p} = p_x \hat{\mathbf{x}} + p_y \hat{\mathbf{y}} + p_z \hat{\mathbf{z}} = k_x \hat{\mathbf{x}} + k_y \hat{\mathbf{y}} + \sqrt{\omega^2/V_p^2 - k_x^2 - k_y^2} \hat{\mathbf{z}} \quad (7)$$

$$\mathbf{s} = s_x \hat{\mathbf{x}} + s_y \hat{\mathbf{y}} + s_z \hat{\mathbf{z}} = k_x \hat{\mathbf{x}} + k_y \hat{\mathbf{y}} + \sqrt{\omega^2/V_s^2 - k_x^2 - k_y^2} \hat{\mathbf{z}} \quad (8)$$

と表せる。ここで、 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ はそれぞれ x, y 軸方向の単位ベクトル、 V_p, V_s はそれぞれ P 波速度、S 波速度である。また、 $|\mathbf{s}|$ は式(6)より、

$$|\mathbf{s}| = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} = \frac{\omega}{V_s} \quad (9)$$

となる。

式(2), (3), (4), (5), (9), より, $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ は平面 P 波と平面 SH 波と平面 SV 波の重ね合わせとして次のように表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(x, y, z, t) &= \mathbf{u}_p(x, y, z, t) + \mathbf{u}_{sh}(x, y, z, t) \\ &\quad + \mathbf{u}_{sv}(x, y, z, t) \\ &= \frac{1}{8\pi^3} \int_0^\infty d\omega \int_{-\infty}^\infty dk_x \int_{-\infty}^\infty dk_y \mathbf{M}_1 e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= A_p \mathbf{p} e^{i\mathbf{p} \cdot \mathbf{x}} + A_{sh} (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}}) e^{i\mathbf{s} \cdot \mathbf{x}} \\ &\quad + \frac{V_s}{\omega} A_{sv} (\mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}})) e^{i\mathbf{s} \cdot \mathbf{x}} \end{aligned} \quad (11)$$

である。

水平方向を x, y , 鉛直方向を z とするような xyz 空間において地表面を $z = 0$ と表し, $z = 0$ に受振器を配置する場合を考える。

$\tilde{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z = 0, \omega)$ を, 受振記録を x, y, t 方向へ 3 重フーリエ変換したものと定義すると

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z = 0, \omega) &= \int_{-\infty}^\infty dx \int_{-\infty}^\infty dy \int_{-\infty}^\infty dt \\ &\quad \times \mathbf{u}(x, y, z = 0, t) e^{-i(k_x x + k_y y - \omega t)} \end{aligned} \quad (12)$$

となり, $\mathbf{u}(x, y, z = 0, t)$ に式(10)を代入すると

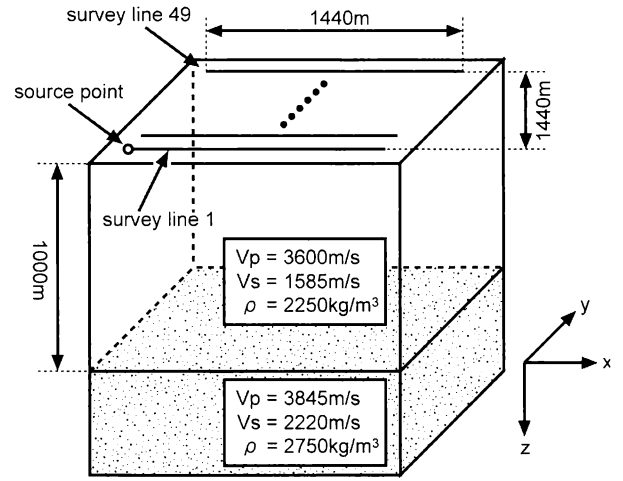


Fig. 1. Simple 3D elastic model with the locations of a source and receivers on the surface. The model has a two-layered velocity structure with a horizontal interface in between.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z = 0, \omega) &= A_p \mathbf{p} + A_{sh} (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}}) \\ &\quad + \frac{V_s}{\omega} A_{sv} (\mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}})) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。ここで, 行列 $\mathbf{M}_2$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_2 &= (\mathbf{p}, \mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}}, \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{z}})) \\ &= \begin{bmatrix} p_x & s_y & s_x s_z \\ p_y & -s_x & s_y s_z \\ p_z & 0 & -(s_x^2 + s_y^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

すると, 式(13)は, $\mathbf{M}_2$ を用いて以下のような行列式として表せる。

Table 1. Specifications of synthetic 3C-3D data

Type of source	P wave source
Type of source wavelet	Ricker wavelet
Peak frequency of source	20 Hz
Maximum length of offset	1440 m
Layout of receivers	49 x 49 grid (30m interval)
Sampling interval	1 msec
Data length	2.048 sec

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} A_p \\ A_{sh} \\ V_s A_{sv} / \omega \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z=0, \omega)$ は受振記録から計算することができ、 $\mathbf{p}, \mathbf{s}$ は式(7)、式(8)からそれぞれ求めることができるので、式(15)において未知なのは、 $A_p(k_x, k_y, \omega)$ と

$A_{sh}(k_x, k_y, \omega)$ と $A_{sv}(k_x, k_y, \omega)$ のみとなる。 $\mathbf{M}_2$ が逆行列 $\mathbf{M}_2^{-1}$ を持つとき、これらの未知数は以下のように求められる。

$$\begin{bmatrix} A_p \\ A_{sh} \\ V_s A_{sv} / \omega \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2^{-1} \tilde{\mathbf{u}} \quad (16)$$

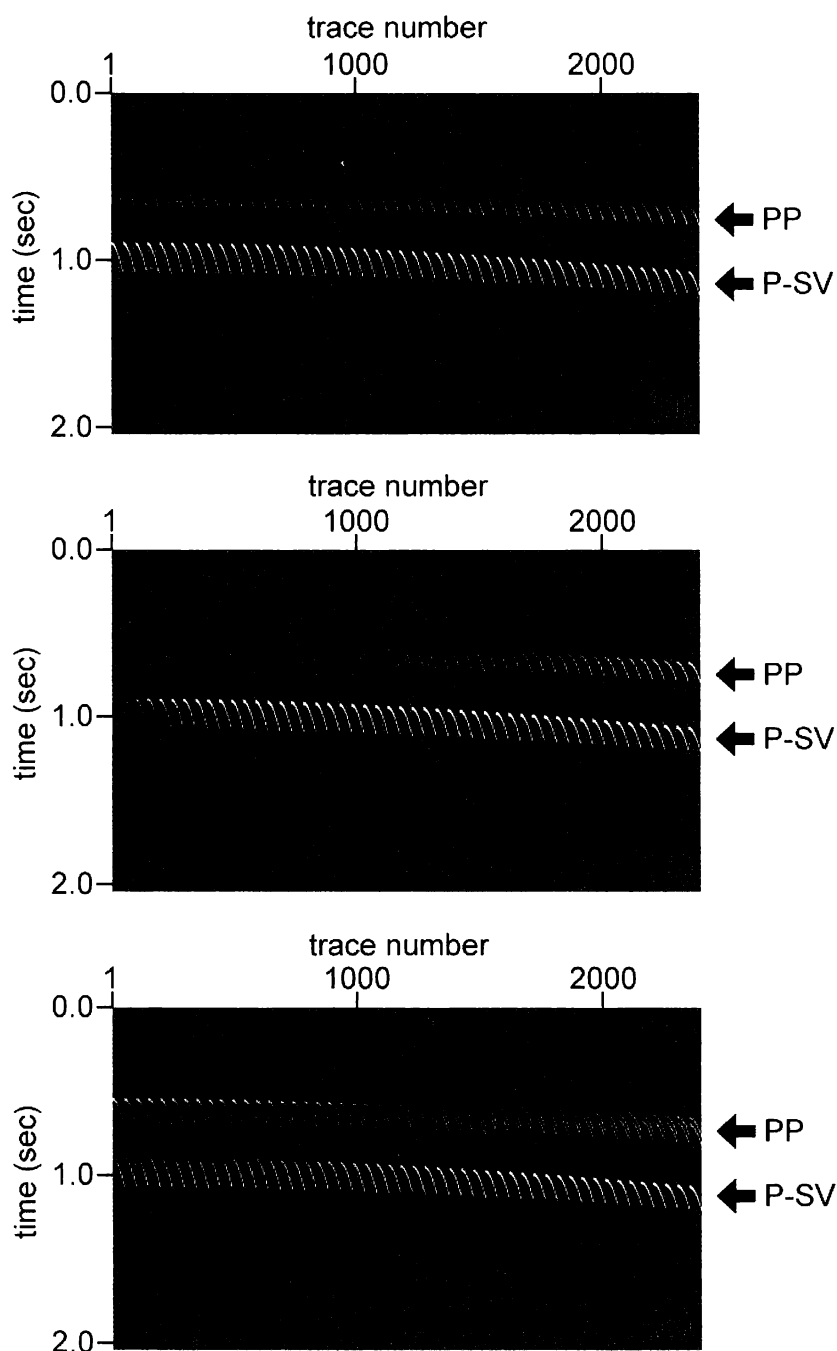


Fig. 2. Raw data of the 3C-3D synthetic records. (a) x component, (b) y component, (c) z component.

$\mathbf{M}_2$ の行列式 $|\mathbf{M}_2|$ は、

$$|\mathbf{M}_2| = \mathbf{p} \cdot \mathbf{s} (s_x^2 + s_y^2) \quad (17)$$

となるが、 $\mathbf{p}$ と $\mathbf{s}$ はともに、波数ベクトルに平行なベクトルなので、 $\mathbf{p} \cdot \mathbf{s} \neq 0$ が成り立ち、 $s_x \neq 0$ または $s_y \neq 0$ のとき $\mathbf{M}_2$ は逆行列 $\mathbf{M}_2^{-1}$ を持つ。ただし、フーリエ変換の分解能の制約のため、数値処理の過程で $s_x = s_y = 0$ として処理されることはない。 $\mathbf{M}_2^{-1}$ は、 $|\mathbf{M}_2|$ を用いて、

$$\mathbf{M}_2^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{M}_2|} \begin{bmatrix} s_x (s_x^2 + s_y^2) & s_z (s_x^2 + s_y^2) \\ p_y (s_x^2 + s_y^2) + p_z s_y s_z & s_z (p_y s_x - p_x s_y) \\ p_z s_x & - (p_x s_x - p_y s_y) \end{bmatrix} \quad (18)$$

と表される。

本研究で導出したアルゴリズムは、式(18)に示す $\mathbf{M}_2^{-1}$ を3重フーリエ変換された受振記録 $\hat{\mathbf{u}}(k_x, k_y, z=0, \omega)$ に乘じ、未知数である3つの変位ポテンシャル関数 A_p, A_{sh}, A_{sv} を求め、式(3)、(4)、(5)にしたがってP、SV、SH波それぞれによる変位ベクトル $\mathbf{u}_p, \mathbf{u}_{sh}, \mathbf{u}_{sv}$ を求めるというものである。

3. 合成データへのP波とS波の分離手法の適用

3.1 合成データの作成

はじめに、陸上反射法地震探査の観測記録を想定した3次元3成分の受振記録を、波線理論に基づく方法によって合成し、作成した合成受振記録に対し分離処理を適用した。Fig. 1およびTable 1に、受振記録を作成する際に設定した地下構造モデル、震源、受振器配置の概要を示す。z軸は鉛直下向きとし、地層境界面は深さ1000mの水平な面とした。Fig. 1の地表面に並ぶ直線と点群は測線配置を示しており、受振器は30m間隔で格子状に49個×49個配置した。震源は受振器配置位置の角に設置し、鉛直方向に震動させた。各受振点では、x、y、z方向の3成分の変位を記録した。

取得された受振記録をFig. 2に示す。受振記録はトレース番号の順番に並べて表示している。トレース番号 N_{trace} は、次式により表される。

$$N_{trace} = 49 \times (N_y - 1) + N_x \quad (19)$$

ここで、 N_y は測線番号、 N_x は測線1におけるトレース番号である。 N_x, N_y はx、y座標の小さい順に1, 2, ..., 49とする。

速度分布および震源と受振器の位置関係から、Fig. 2右端に矢印で示すように反射P波およびP-SV変換波が記録されたことがわかる。震源にはP波震源を用いた。反射SV波および反射SH波は確認できず、SV-P変換波の発生もほとんどないと考えられる。

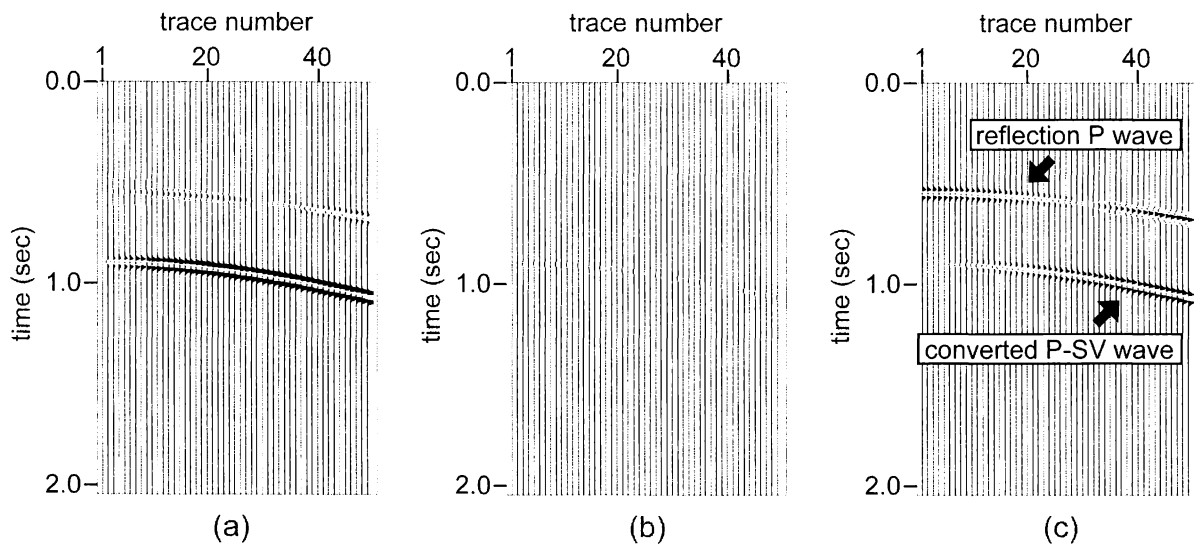


Fig. 3. Raw data of the 3C synthetic records on the Line 1. (a) x component, (b) y component, (c) z component.

3.2 P波とS波の分離処理結果

本手法を適用することによって得られるP波とS波の分離記録は全トレースで取得される。しかし、ここでは紙面掲載の制限により震源を通る測線1における記録を代表して示す。はじめに、Fig. 2から測線1のみを抜粋したものをFig. 3に示す。次に、測線1の分離P波記録をFig. 4に示す。 x 成分において反射P波による信号の抽出が確認され、Fig. 3では強振幅のP-SV変換波をFig. 4では抑制できていることがわかる。ただし、 y 成分において本来存在しない反射P波が認められる。さらに、測線1の分離SV波記録をFig. 5に示す。 x 成分において反射P波による信号の除去が確認され、P-SV変換波の抽出が良好に行われていることがわかる。最後に、測線1の分離SH波記録をFig. 6に示す。 y, z 成分において反射P波による信号は確認されない。しかし、P-SV変換波は解析誤差により、 y 成分、 z 成分ともに偽像が発生している。

3.3 分離処理結果の精度評価

本研究が示す分離処理を適用した結果、抽出対象とするイベントを強調し、除去対象とするイベントの振幅を抑制する傾向が認められた。本節では、その分離精度を評価する。各トレースにおいて観測された反射P波およびP-SV変換波の振幅の強さ $|u_{pp}|$ 、 $|u_{ps}|$ を読み取り、参照記録の振幅の強さと比較することにより、分離精度の評価を試みる。ここで、参照記録とは、波線理論により合成された反射P波のみによる受振記録を指しており、分離P波記録の正解の記録と考えられる。 $|u_{pp}|$ は式(20)のように定義する。

$$|u_{pp}| = |u_{pp}(x, y)| \quad (20)$$

$$= \sqrt{u_{ppx}(x, y)^2 + u_{ppy}(x, y)^2 + u_{ppz}(x, y)^2}$$

分離前の記録、分離の結果出力される3つの記録(分離P波記録、分離SV波記録、分離SH波記録)、3つの参照記録(参照P波記録、参照SV波記録、参照SH波記録)、合計7つの記録に対し、式(20)に示す演算を行ったものをFig. 7に示す。

はじめに、Fig. 7bとFig. 7cの比較により、F-K領域における分離フィルタが反射P波を抽出し、P-SV変換波を除去した結果、S/N比(ここでの信号と雑音はそれぞれ $|u_{pp}|$ 、 $|u_{ps}|$ を指す。)が向上したことがわかる。次に、Fig. 7dとFig. 7eの比較により、F-K領域における分離フィルタが反射P波を除去し、P-SV変換波を抽出した結果、S/N比(ここでの信号と雑音はそれぞれ $|u_{ps}|$ 、 $|u_{pp}|$ を指す。)が向上したことがわかる。しかし、受振点配置の端

付近(特に $x=0$ および $y=0$ 上)では、P-SV変換波の抽出が不完全であることがわかる。最後に、Fig. 7fとFig. 7gの比較により、F-K領域における分離フィルタが反射P波を除去し、P-SV変換波を弱めていることがわかる。また、P-SV変換波の除去が不完全な部分はFig. 7eにおいてP-SV変換波の抽出が不完全であった部分と一致する。したがって、 x 軸や y 軸付近の領域では、分離処理の過程でP-SV波による振幅の一部がSH波によるものと誤って解析されていると推定される。

ここで、分離前記録の $\sum|u_{pp}|$ を1.00とした場合の、分離P、SV、SH波の $\sum|u_{pp}|$ と $\sum|u_{ps}|$ の振幅比をTable 2に示す。分離P波の抽出率は73%、P-SV変換波の抽出率は81%であることがわかる。これより、本分離手法による分離P波記録および分離SV波記録は、S/N比の向上に有効な分離精度を有すると考えられる。しかし、Fig. 7では震源近傍において正しく分離されていない傾向も認められる。これは、受振点における波線ベクトルの水平成分が小さい場合に誤差を生じやすい、すなわち、フーリエ変換の際に波数方向の分解能が低下することが影響しているためと考えられる。

そこで、分離精度に影響する波数方向分解能を定量的に評価するため、入射波の波数ベクトルの水平成分を、波数方向の分解能により正規化することを考える。ここで、波数方向の分解能 Δk 、および入射波の波数ベクトルの水平成分 k_H を式(21)、式(22)のように定義する。

$$\Delta k = \frac{1}{\Delta x \cdot n_x} \quad (21)$$

$$k_H = f_{peak} \frac{\sin \theta_p}{V_p} \quad (22)$$

ここで、 Δx は x 軸方向の受振点間隔、 n_x は x 軸方向の受振点数、 f_{peak} は入射波の卓越周波数、 θ_p は反射P波の入射角である。このように定義した $k_H / \Delta k$ を横軸に取り、 $|u_{pp}|$ をプロットしたものをFig. 8に示す。

θ_p は波線理論に基づく波動場合成の過程で既知であり、また、 f_{peak} には、震源として与えたりッカーウエー

Table 2. The ratios of decomposed P, SV and SH waves are shown when the $\sum|u_{pp}|$ of raw data is 1.00.

	$\sum u_{pp} $	$\sum u_{ps} $
raw data	1.00	6.40
decomposed P wave	0.73	0.63
decomposed SV wave	0.20	5.21
decomposed SH wave	0.06	0.55

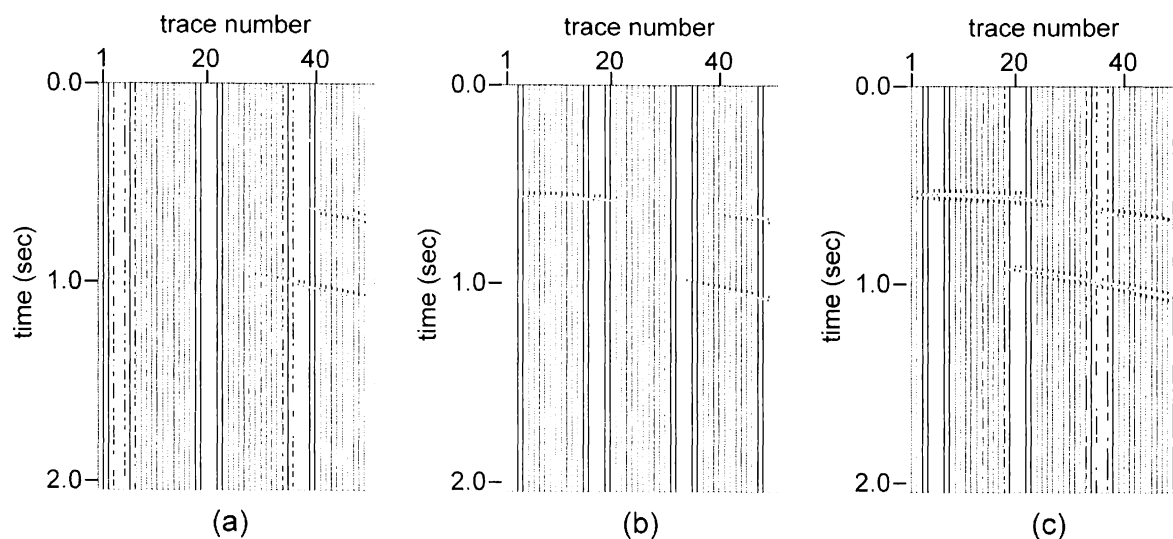


Fig. 4. Sections of the decomposed P wave on the Line 1. (a) x component, (b) y component, (c) z component.

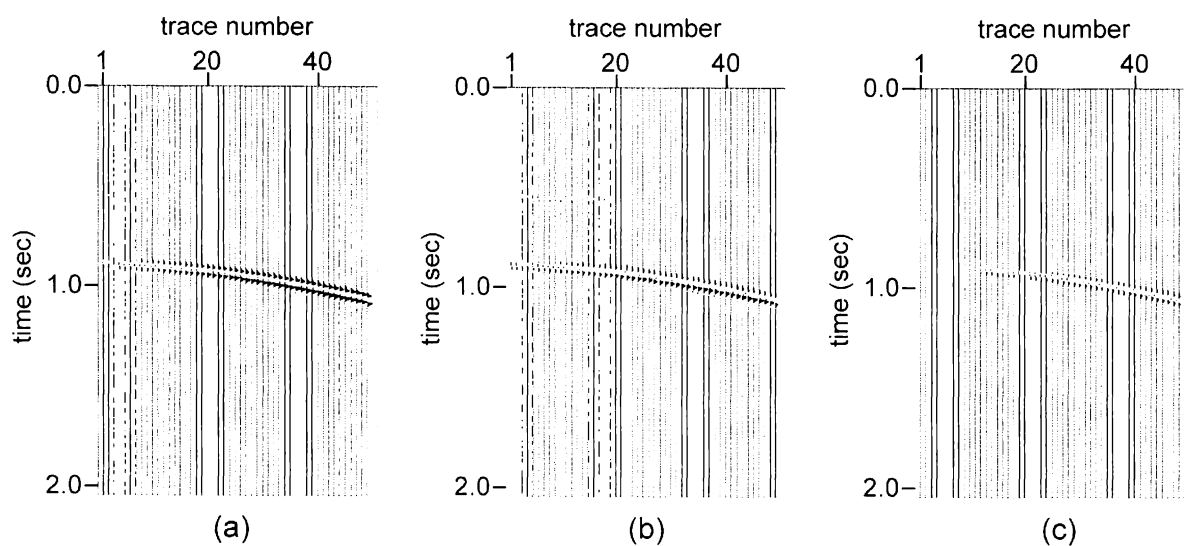


Fig. 5. Sections of the decomposed SV wave on the Line 1. (a) x component, (b) y component, (c) z component.

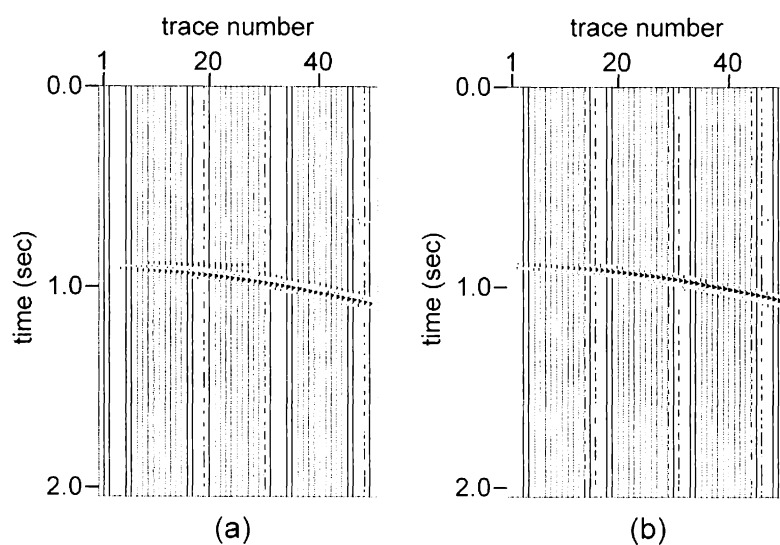


Fig. 6. Sections of the decomposed SH wave on the Line 1. (a) y component, (b) z component.

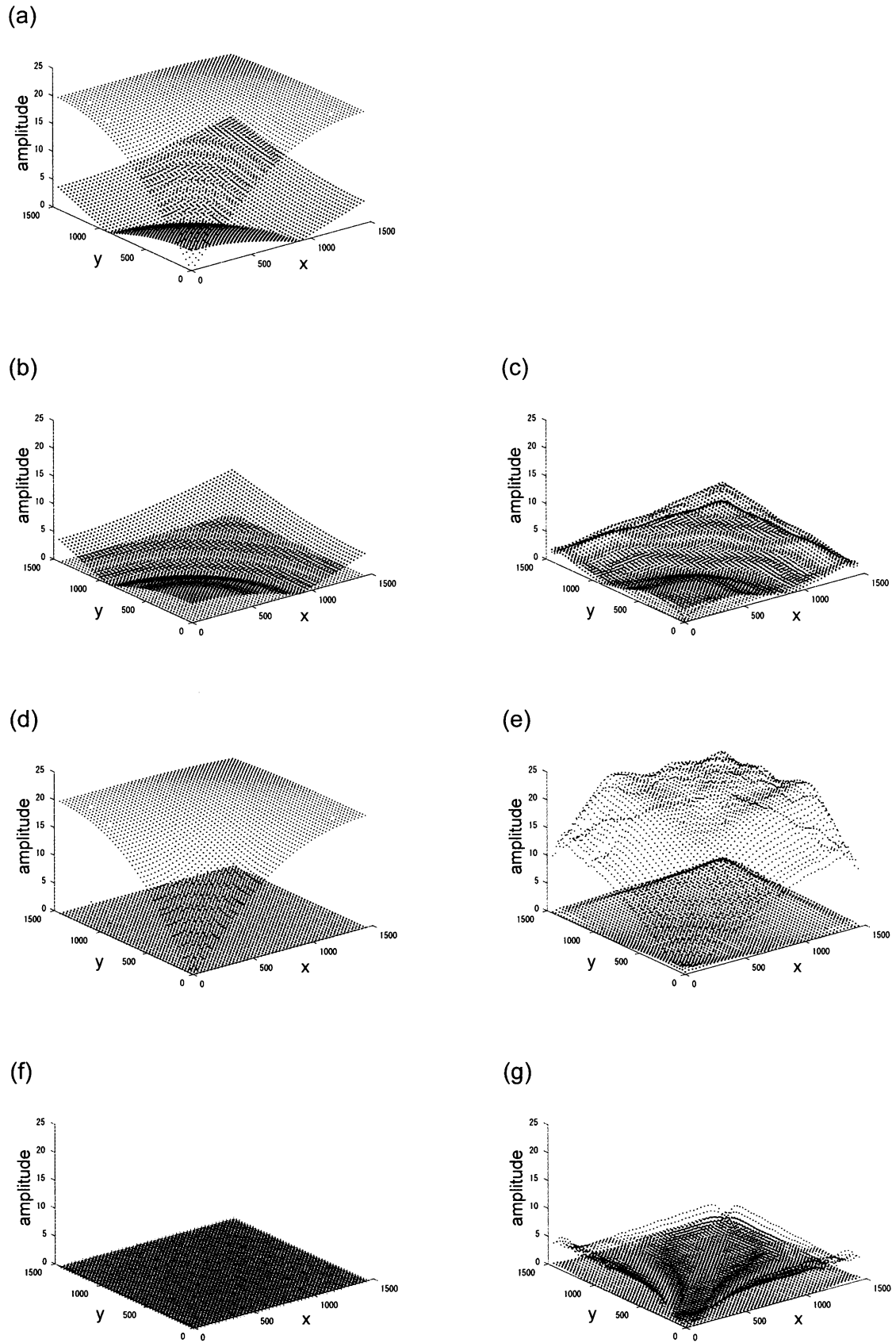


Fig. 7. $|u_{PP}|$ and $|u_{PS}|$ observed on each trace. The blue dots represent $|u_{PP}|$ and the green dots represent $|u_{PS}|$. (a) Raw data, (b) Theoretical P wave, (c) Decomposed P wave, (d) Theoretical SV wave, (e) Decomposed SV wave, (f) Theoretical SH wave, (g) Decomposed SH wave.

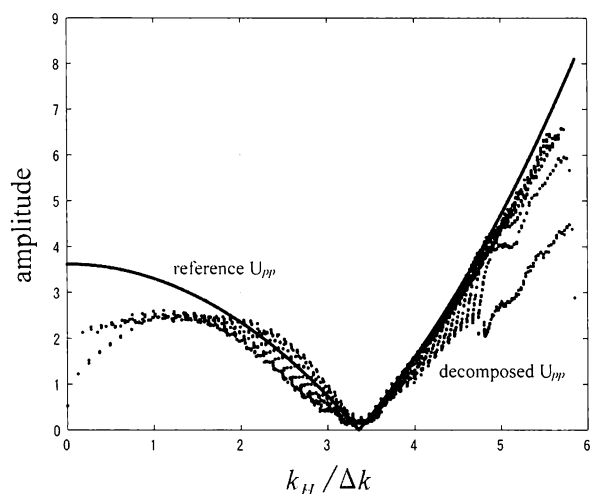


Fig. 8. Graph of $|u_{pp}|$ versus $k_H / \Delta k$. The black line represents reference u_{pp} and the blue dots represent decomposed u_{pp} .

ブレットの中心周波数を用いた。Fig. 8 から、 $k_H / \Delta k$ の値が2程度よりも小さくなるような平面波は、分離の結果として振幅が理論値よりも小さく出力されることがわかる。ここで、 $k_H / \Delta k$ は θ_r の関数であるので、反射波が垂直に近い入射角を持って受振点に入射する場合、つまり受振点における波線ベクトルの水平成分が小さい場合には、分離精度が低下する傾向があることがわかる。

4. フィールドデータへのP波とS波の分離手法の適用

4.1 適用したフィールドデータの概要

本分離手法の実際の記録での有効性を確認するため、本節ではフィールドデータへの適用結果を示す。評価用データとして、カナダのコンソーシアムである CREWES (Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology) の提供するデータ「3C-3D SEISMIC DATA SET」の一部を用いた。このデータはカナダのアルバータ州近郊の Blackfoot において 1995 年に行われた 3 次元 3 成分の反射法地震探査の記録である。震源および受振器の配置を Fig. 9 に示す。紙面上方が北である。解析に用いたショットギャザーの震源位置を Fig. 9 中に丸印で示す。受振器は水平 2 成分 (H1, H2) と鉛直 1 成分 (V) で構成される 3 成分ジオフォンであり、極性は、H1 が北向き、H2 が東向き、V は鉛直下向きを正としている。受振器測線は東西方向に 15 本配置され、南北方向の間隔は 255m となっている。各測線上には 60m 間隔で 42 個の受振器が配置されている。Table 3 に使用したデータの仕様を示す。

トレース番号順に並べた受振記録を Fig. 10 に示す。トレース番号 N_{trace} は、次式により表される。

$$N_{trace} = 49 \times (N_{line} - 1) + N_i \quad (23)$$

ここで、 N_{line} は測線番号、 N_i は測線 1 におけるトレース番号である。 N_{line} は北から南へ、 N_i は西から東へ順に 1, 2, ... と増加する。

Fig. 10 に示す H1, H2, V の各成分ともに、矢印(1) の指すトレース付近に低周波ノイズが認められる。震源が測線 5 と測線 6 の間に位置するため、発破の残響信号をとらえたものと考えられる。また、Fig. 10 下段に示す z 成分の記録の、震源に最も近い測線 5 や測線 6 において、振幅の強い直接波が直線状に観測されていることが確認できる。直接波は震源から離れるにしたがい減衰している。さらに、同じ z 成分の記録の矢印(2)の指す時刻 (0.9~1.0s(sec)) に、P 波の 1 次反射と考えられるイベントが確認できる。また、本データセットには、P-SV 変換波の存在が Simin et al. (1996) により報告されている。したがって、1.0sec より後の時刻に P-SV 変換波による信号が混在していることが考えられる。本研究では、(1) 反射 P 波による信号の S/N 比の向上、(2) 混在する P-SV 変換波による信号の抽出、の 2 点を目的として分離処理を適用した。

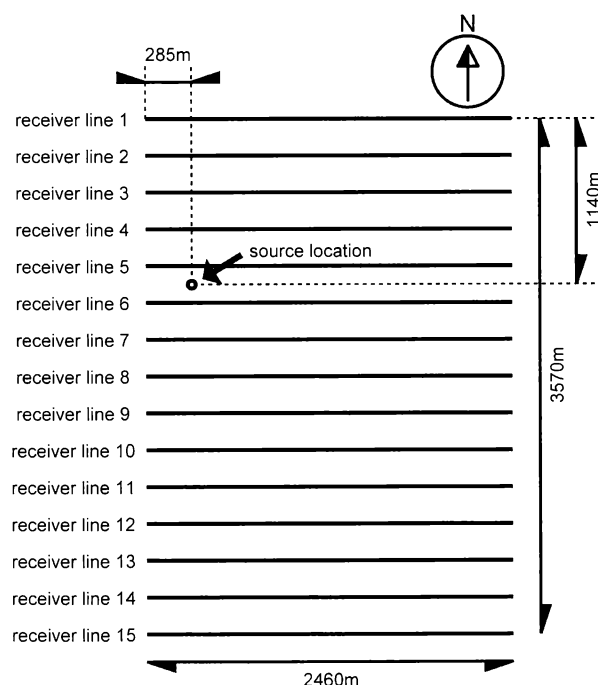


Fig. 9. Geometry of source and receiver lines for the 3C-3D seismic survey. The source location used in this study is shown by a circle. Receiver locations used in this study are shown by horizontal lines.

Table 3. Specifications of the 3C-3D seismic data recorded in an actual field.

Type of source	Dynamite
Direction of receiver line	East-west direction
Interval of receivers	60 m
Interval of receiver lines	255 m
Number of receiver lines	15
Number of receivers	628
Sampling interval	2 msec
Data length	2.0 sec

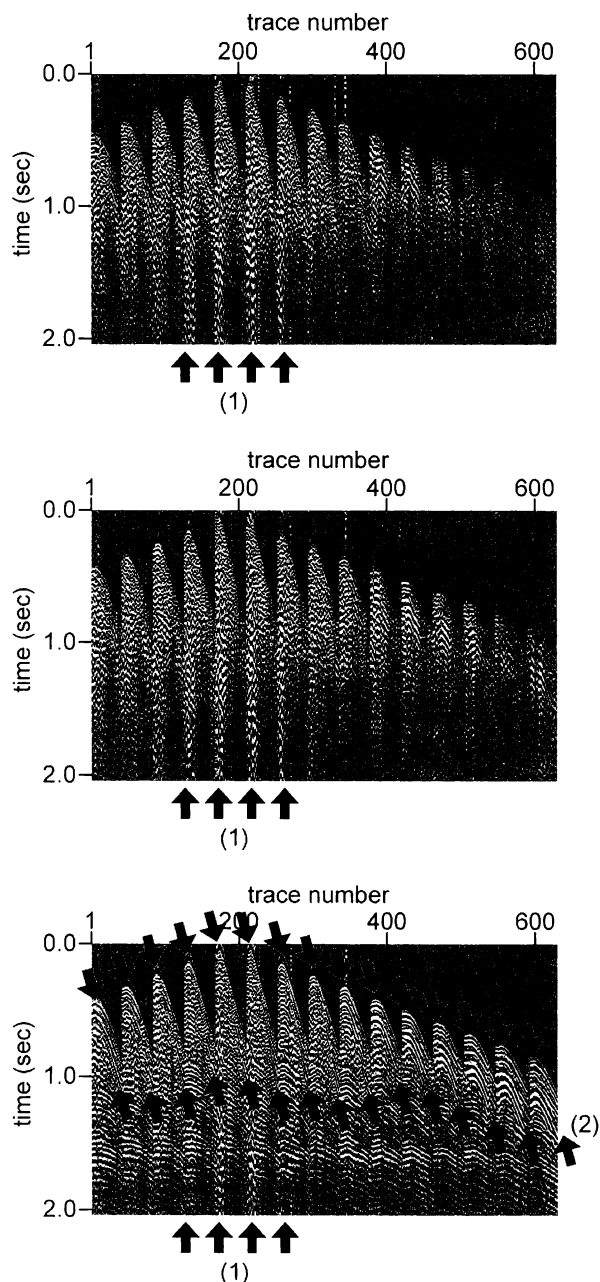


Fig. 10. Raw data of the field records obtained by the receivers shown in Fig.9. (a) H1 component, (b) H2 component, (c) V component.

4.2 フィールドデータの分離処理結果

直接波をミュートにより除去する前処理を施した後、本研究で提案する分離手法を適用した。分離処理結果は全受振点で得られるが、紙面掲載の制約のため、震源から最も離れた測線 15 における記録を代表して示す。

はじめに、測線 15 のミュート処理後の記録を Fig. 11 に示す。Fig. 11c の矢印で示す走時に、P 波の 1 次反射と考えられるイベントが確認できる。一方、P-SV 波のイベントの特定は難しい。本ミュート処理適用後記録に対して、P 波および S 波の分離処理を適用した。分離に必要なパラメータである表層における P 波および S 波の速度は、それぞれ 2000m/sec および 1000m/sec とした。

測線 15 の分離処理後記録を Fig. 12 に示す。Fig. 12a, 12b, 12c に示す分離 P 波記録では、水平成分の振幅が抑制され、明瞭なイベントは鉛直成分の記録において卓越している。Fig. 12c に示す分離 P 波記録の V 成分では、Fig. 11c 中に矢印で示す P 波の 1 次反射波と考えられるイベントが抽出されている。

一方、Fig. 12d, 12e, 12f に示す分離 SV 波記録では、鉛直成分の振幅が抑制され、明瞭なイベントは水平成分の記録において卓越している。特に H1 成分の記録上での卓越が認められる。Fig. 12f に示す分離 SV 波記録の V 成分では、Fig. 11c 中に矢印で示す P 波の 1 次反射波と考えられるイベントが抑制されている。また、Fig. 11a, 11b と Fig. 12d, 12e を比較すると、分離処理の適用により波形の連続性が改善されたことがわかる。Fig. 12d 中の矢印で示す部分に特に連続した波群が確認できる。これらの波群の傾きは反射 P 波の傾きよりも大きい。また、Fig. 12g, 12h に示す分離 SH 波記録では、H2 成分の振幅が H1 成分の振幅よりも大きい結果となった。Fig. 11b と Fig. 12h を比較すると、分離処理の適用により波形の連続性が改善されたことがわかる。Fig. 12h 中の矢印で示す部分に連続した波群が確認できる。これらの波群の傾きは反射 P 波の傾きよりも大きい。

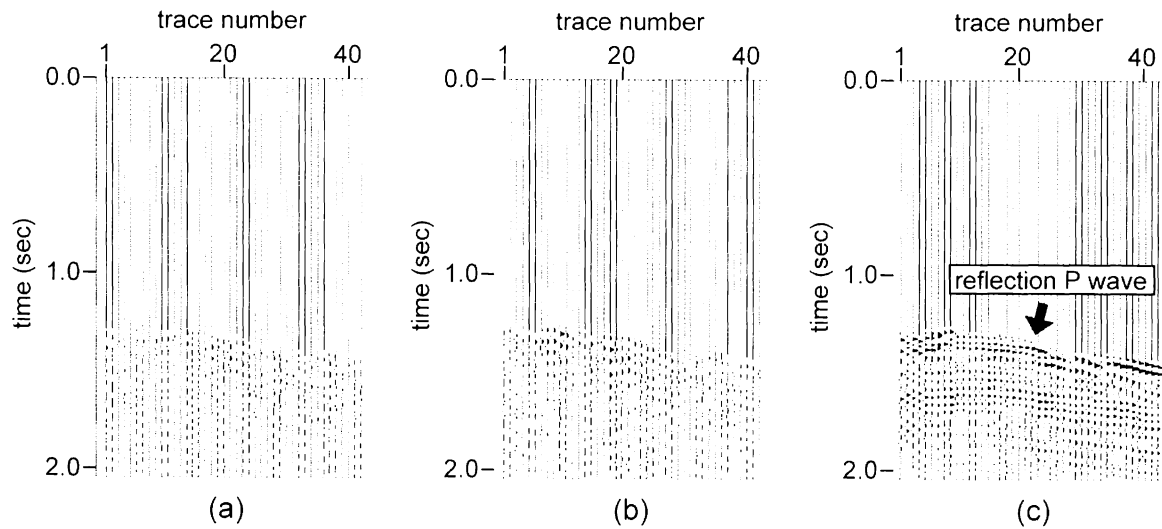


Fig. 11. Sections of the Line 15 after applied mute processing. (a) H1 component (b) H2 component (c) V component.

分離P波記録では、反射P波と考えられるイベントを含む鉛直成分の卓越が認められたことから、P波とS波の分離処理によりS/N比が向上したと判断できる。また、分離SV波記録では、反射P波と考えられるイベントが抑制された。さらに、分離SV波記録のH1成分では、波形の連続性が改善され、分離前の記録のV成分上の反射P波と考えられるイベントよりも大きな傾きで観測される波群が確認された。P波とS波の分離処理により強調されたこれらの波群は、P-SV変換波によるイベントであると考えられる。一方、分離SH波記録のH2成分でも、同様に波形の連続性が改善され、分離前の記録のV成分上の反射P波と考えられるイベントよりも大きな傾きで観測される波群が確認された。これらの波群は、連続する波形の逆延長が反射P波による信号と交差するため、ミュートにより除去しきれなかった直接波と考えられる。ただし、分離誤差の可能性も存在する。

5. まとめ

本研究では、Devaney and Oristaglio (1986) の手法を3次元に拡張することにより、3成分3次元反射法地震探査データから、P、SV、SHの各波によるイベントを分離および抽出する手法を開発した。3次元空間における分散関係式を用いて、入射方向に関わらずP波とS波を分離および抽出するアルゴリズムを開発した。

波線理論に基づく方法により合成した3成分3次元データに、本手法を適用した結果、P、SV、SHの各波によるイベントの分離および抽出が確認され、本手法が3成分3次元反射法地震探査データの解析手法として有用であることを確認した。また、波線理論に基づく参照

記録との比較により、分離結果の精度を定量的に評価し、本手法の有効な適用範囲を考察した。分離の精度は、入射波の波線ベクトルの水平成分が波数方向分解能に比べて小さい場合に低下した。そのため、本分離手法を適用する際には、震源と受振器の配置に留意する必要があることがわかった。

さらに、本手法を実際の3成分3次元陸上反射法地震探査データに適用した結果、P波による信号のS/N比が向上し、分離前には他の信号と混在し認識できなかったP-SV変換波による信号を抽出し、本手法の実用可能性を確認した。

本研究で開発した手法は、3次元3成分反射法地震探査データに対し、P、SV、SHの各波によるイベントの分離および抽出を可能とする。処理を行う際に必要なパラメータは、受振器近傍におけるP波およびS波の速度のみである。また、本手法は、3成分データとして取得された波動場をベクトルとして処理するため、振幅補償などの処理を行う前に適用する必要がある。

実際の地下構造は速度不均質性を有しているが、本研究では処理の際のパラメータとして表層付近のP波およびS波の速度を用いた。そのため、処理手法の信頼性向上には、処理に用いる適切な速度の決定方法を議論する必要がある。一方、異方性を有する媒質に対しては、任意の方向のP波およびS波速度が決定できれば、本手法を拡張して適用することが可能であると考えられる。今後、物理探査に対する精度要求がますます高まる中、3次元3成分地震探査が主流となることが予想され、本研究の示すような3次元3成分記録に対するデータ処理手法の開発要求が高まるものと考えられる。

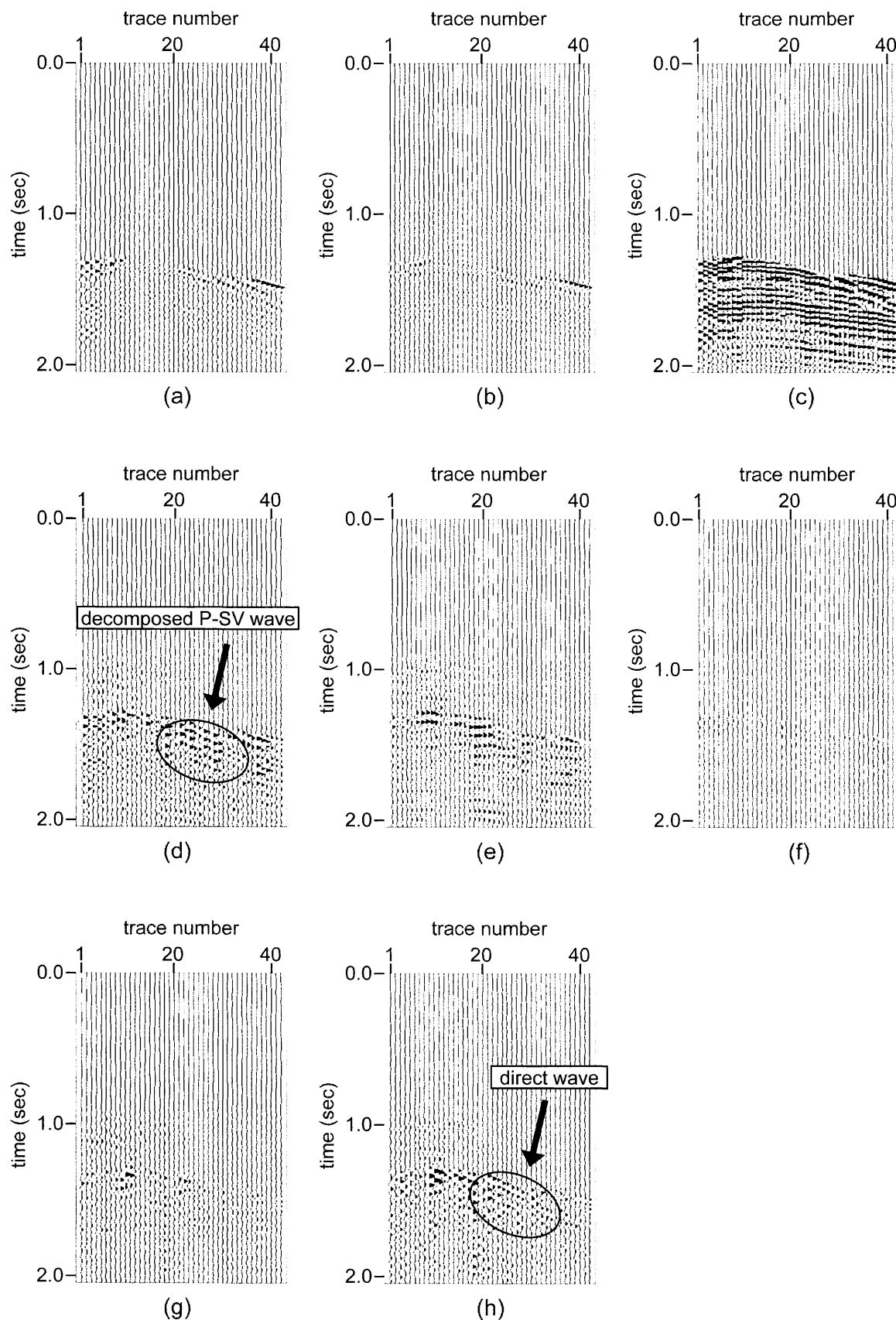


Fig. 12. Sections after applied the decomposition processing. (a) H1 component of decomposed P wave, (b) H2 component of decomposed P wave, (c) V component of decomposed P wave, (d) H1 component of decomposed SV wave, (e) H2 component of decomposed SV wave, (f) V component of decomposed SV wave, (g) H1 component of decomposed SH wave, (h) H2 component of decomposed SH wave.

謝 辞

本研究において、3次元現場データの解析ではCREWES (Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology)の提供するデータを使わせていただきました。また、本研究の一部は株式会社地球科学総合研究所からの受託研究として行われました。2名の匿名の査読者には、本論文を改善するために有益なご指摘をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 赤間健一・川中 卓 (2009): PS変換波を用いた地震探査, 石油技術協会誌, **74**, 247-251.
- Al-anboori, A., van der Baan, M., and Kendall, J. M. (2005): Approximate separation of pure-mode and converted waves in 3-C reflection seismics by τ -p transform, *Geophysics*, **70**, V81-V86.
- 浅川栄一・高橋浩央・川合裕二・小笠原幸俊・佐伯龍男 (2006): 海域におけるマルチコンポーネント反射法地震探査, 物理探査学会学術講演会講演論文集, **115**, 100-102.
- 浅川栄一・高橋浩央・川合裕二・小笠原幸俊・佐伯龍男 (2007): 海域におけるマルチコンポーネント反射法地震探査(2), 物理探査学会学術講演会講演論文集, **117**, 88-91.
- Asakawa, E., and Ward, P. (2007): Data Processing of Marine Multicomponent Seismic -A Case Study of 4-Component 2D OBC data, Offshore Norway -, *BUTSURI-TANSA*, **60**, 155-170.
- Devaney, A. J., and Oristaglio, M. L. (1986): A plane-wave decomposition for elastic wave fields applied to the separation of P-waves and S-waves in vector seismic data, *Geophysics*, **51**, 419-423.
- Hovic, E., and Amundsen, L. (2005): Elimination of the overburden response from multicomponent source and receiver seismic data, with source signature and decomposition into PP-, PS-, SP-, SS-wave responses, *Geophysics*, **70**, S43-S59.
- 加野直巳・横倉隆伸・山口和雄・木口 努 (2004): PS変換波を利用した反射法地震探査の基礎実験, 物理探査, **57**, 285-296.
- Lawton, D. C., Stewart, R. R., Cordsen, A., and Hrycak, S. (1996): Design review of the Blackfoot 3C-3D seismic program, *CREWES Research Report*, **8**, 38.1-38.23.
- 白石和也・阿部 進・斉藤秀雄・佐藤比呂志・越谷 信・川中卓 (2008): P-S変換波を用いた深部構造探査—3成分MEMS加速度センサーによる北上低地帯横断地殻構造調査を例として—, 物理探査学会学術講演会講演論文集, **118**, 131-134.
- Simin, V., Harrison, M. P., and Lorentz, G. A. (1996): Processing the Blackfoot 3C-3D seismic survey, *CREWES Research Report*, **8**, 39.1-39.11.
- Sun, R., McMechan, G. A., Hsiao, H., and Chow, J. (2004): Separating P- and S-waves in prestack 3D elastic seismograms using divergence and curl, *Geophysics*, **69**, 286-297.
- 徳永裕之・三ヶ田均・真田佳典・芦田 譲 (2008): 分散関係式を用いたP,S波分離, 物理探査, **61**, 375-383.
- Wapenaar, C. P. A., Herrmann, P., Verschuur, D. J., and Berkhout, A. J. (1990): Decomposition of multicomponent seismic data into primary P- and S-wave responses, *Geophysical Prospecting*, **38**, 633-661.

Plane-wave decomposition into P and S waves using dispersion relationship for three component and three dimensional reflection seismic data

Yutaka Okano*, Hitoshi Mikada**, Kyosuke Onishi*³ and Tada-Nori Goto**

ABSTRACT

We developed a method to separate P, SV and SH waves from three component (3C) and three dimensional (3D) reflection seismic data by a plane wave decomposition in frequency-wave number (k_x , k_y) domain. First, we applied the method to 3C-3D synthetic data and demonstrated to separate multi-mode mixed wave fields into P, SV and SH modes, respectively. Furthermore, we applied the method to an actual 3C-3D field data. As a result, the developed method improved the S/N ratio of P-wave signals and it extracted P-SV converted waves properly. These application results to the synthetic and actual data proof the validity and applicability of this method.

Keywords: P and S wave separation, plane-wave decomposition, dispersion relationship, 3D survey, 3C data

Manuscript received June 23, 2010; Accepted May 15, 2011.

* Kyoto University
Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540 Japan
(Present Affiliation: INPEX CORPORATION
Akasaka Biz Tower, 5-3-1, Akasaka, Minato-ku, Tokyo
107-6332, Japan)

** Kyoto University
Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540 Japan
*³ Akita University
1-1, Tegatagakuenmachi, Akita 010-8502, Japan

A part of this paper was presented at the 120th SEGJ spring conference, 2009.