地殻内構造と物性の解明のための 反射法地震探査の技術動向

名古屋大学大学院環境学研究科
附属地震火山・防災研究センター*

渡辺 俊樹

Technical Trends on Seismic Reflection Method for Understanding Structure and Physical Properties in the Crust

Toshiki WATANABE

Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster
Mitigation, Graduate School of Environmental Studies,
Nagoya University, D2-2 (510) Furo-cho, Chikusa-ku,
Nagoya 464-8601, Japan

(Received March 31, 2008; Accepted August 25, 2008)

Seismic reflection method is the most powerful and successful tool to understand the structure and the physical properties in the shallow crust, especially in sedimentary layers. Since it plays major role to explore hydrocarbon resources, the oil industry has been taking the initiative in developing new technologies for both data acquisition and processing. In 1990s, 3D survey became a routine technology. It provides the detailed geological model of complicated subsurface structures with high resolution. This paper reviews the recent technical trends on seismic reflection method mainly developed and utilized in the oil industry. The topics include high-density and high-resolution data acquisition and processing of 3D seismic data, direct estimation of physical properties of subsurface layers from seismic data, and time-lapse survey for monitoring subsurface fluid flow. Their concepts and techniques have been and will continue to be introduced to earth science and earthquake studies. New promising analysis method such as the waveform inversion and the virtual source method are also reviewed.

Key words: Seismic reflection method, 3D, High-resolution, Physical properties, Time-lapse

§ 1. はじめに

反射法地震探査は人工震源を用いて取得した反射波形データからさまざまな処理を経て地殻の比較的浅部の詳細な構造を得る手法である [Yilmaz (2001)]. この手法は炭化水素資源の探査を大きな原動力として研究開発

が進められて発展し、その成果が地球科学に導入されてきた経緯を持つ。そこで、本稿は本特集号の他のレビューとはやや趣を異にし、資源探査を背景とした高精度・高分解能な探査手法としての反射法地震探査の技術動向をレビューする。これらのアイディアはこれまで同様に地震学にインパクトを与え得ると考えられる。反射法地震探査は巨大技術であるため、限られた誌面では地震学との関連を念頭に置いて限定的に取り上げた。

資源探査においては、1990年代に3次元反射法地震探査がルーチン化した。海上3次元探査では、探査船が数m間隔でハイドロフォン（圧力センサー）を配置した長さ4~6kmのストリーマケーブルを100m程度の間隔で同時に8~10本（開発中で最大22本）曳航し25m程度のエアガン発震間隔で1,000~10,000km²の調査範囲のデータを取得することが一般的になっている。一方、パイプリータ震源による陸上3次元探査では、Cascaded Sweep [Benabentos *et al.* (2006)]などの導入によって測定効率が著しく向上し、あわせてwide-azimuthデータの取得が普及している。このようにして得られた高精度大容量の波形データから堆積構造、例えば蛇行するチャネルや扇状地、デルタなどを詳細に3次元可視化することが可能になり、地下の認識が飛躍的に進歩した。3次元反射法地震探査は堆積学に大きなインパクトを与え、地震地形学 (Seismic geomorphology) の成立を促した [高野・他 (2006)]。現在では、資源探査における反射法地震探査（を含む物理探査）は、単に新規探鉱の手法ではなく、掘削や検層、岩石物理、地質モデリングや貯留層シミュレーションなどが統合された「貯留層マネージメント」という巨大総合技術の一翼に位置づけられている [Alsos *et al.* (2002)]。

地球科学分野においては、1970年代に反射法技術が導入され地殻構造の解明に貢献してきた。地震学における反射法を含む各種の構造探査の意義と成果は本記念特集号の小平 (2008)、岩崎・佐藤 (2008) の2編のレビューに詳しい。今後も資源探査が先導して開発された技術が地震学へ導入される流れは続くと思われ。

§ 2. 最近の技術動向

反射法地震探査技術は、

- ・ 大量、高密度、高品質、多種類のデータ取得
- ・ それらをフルに活用して波形から情報を取り出す高度なデータ解析

という方向に発達してきた。その背景には、炭化水素資源の貯留層が大規模な背斜構造から小規模かつ複雑な地質構造になっていること、従来の堆積層を対象とした技術では対応できない岩塩ドームや断層系などの新たな対

*〒464-8601 名古屋市千種区不老町 D2-2 (510)

象への対応が必要なことがある。本稿では研究開発の動向を以下の観点からまとめる。

- (1) 高精度・高分解能な探査
- (2) 地層の物性値の直接探知
- (3) 探査からモニタリングへ

2.1 高精度・高分解能な探査

高精度探査の対象の一例である岩塩ドームは複雑な3次元形状を有する均質な高速度岩体である。その側面や下部に存在する小規模な貯留層は近年重要な探査対象になっているが、その高精度なイメージングは困難な課題であった。以下の点がデータ取得に要求される。

- ・複雑な形状を有する探査対象の全体に渡って均質に地震波を照射し均一な反射点分布を得ること。
- ・多重反射波の除去などに高度な処理を適用する際に、空間エリアシングによる偽像を抑制するため、高い空間密度でデータをサンプルすること。
- ・分解能向上のための広帯域化（この場合は高周波数化）。

このために、単に領域を面的にカバーしてデータ取得するだけでなく、データ取得の方向角 (azimuth) を増やした multi-azimuth, wide-azimuth, rich-azimuth といったデータ取得が、多船式ストリーマケーブル曳航技術及び着底型ケーブルシステムの開発に伴って、海上探査において実現された [Barley and Summers (2007)]。これらの技術はフラクチャ型貯留層の方向角異方性の検出も可能にした [Lynn *et al.* (1996)]。

3次元構造のイメージングには反射点を空間的に正しい位置にマッピングする手法であるマイグレーションの高度化が大きく寄与した。高密度なデータをフルに活用した波動方程式に基づく重合前深度マイグレーション (PSDM: prestack depth migration) の手法が多数提唱されており、マイグレーションによる速度構造モデルの構築やイメージのフォーカスを向上させる研究が精力的に行われている [Biondi (2007) など]。Transverse isotropic な異方性のマイグレーションへの導入 [Ren *et al.* (2005)] も進められている。

2.2 地層の物性値の直接探知

反射法探査の結果から地層内の物性値を直接推定する研究が盛んに行われている。さらに、3次元探査の発展は物性値の空間分布を得ることを可能にした。

多孔質媒質や粒状体のミクロな構造や物性とマクロな地層特性との関係は Gassmann (1951), Biot (1956a, 1956b) らの先駆的な研究に始まった。多孔質媒質の孔隙内の充填物、特に、液相や気相の物性、存在形態、飽和度と弾性波速度との関係について、また、微細層構造や孔隙、フラクチャの存在、応力状態などによって生じ

る非弾性減衰や異方性について、理論、実験、フィールドの各面で研究が進められ、多大な成果がもたらされた [Mavko *et al.* (1998)]。

代表的な物性値検出手法に AVO (Amplitude Variation with Offset), AVA (Amplitude Variation with Angle) がある [Ostrander (1984)]。P 波の反射係数は入射角と V_p , V_s , ρ の関数である [Shuey (1985)]。ことから、入射角に対する反射波振幅の変化からこれらの物性情報が得られる。反射波記録から岩質と孔隙内の液相・気相の存在とその種類を直接推定可能であり [Castagna and Swan (1997)]、AVO 解析は炭化水素資源の探査に重要な手法となった。

波形の持つさまざまな情報を地震波属性 (アトリビュート) と呼ぶ。ヒルベルト変換を用いた複素トレース解析による瞬間振幅、瞬間位相、瞬間周波数などの古典的な地震波属性 [Taner *et al.* (1979)] に加えて、AVO 応答も含めさまざまな地震波属性が提唱され、岩石物性との関係が議論された。稲盛・他 (2006) は P 波および S 波インピーダンス、擬似ポアソン比などの地震波属性を用いてメタンハイドレートの賦存域や飽和率を推定している。

従来、反射法では主に P 波が用いられてきたが、物性情報を取得するため S 波構造の重要性が増している。近年はハイドロフォン (圧力センサー) とジオフォン (速度型地震計) 3 成分を内蔵した dual sensor あるいは 4C と呼ばれるストリーマや、海底に面的に設置した OBC (Ocean Bottom Cable) あるいは OBS (Ocean Bottom Seismometer) が用いられ、4C 地震探査と呼ばれる [Barley and Summers (2007)]。4C の最大の利点は、ハイドロフォンとジオフォンの海面ゴースト波に対する応答特性の違いを利用した多重反射波抑制が可能な点である [Hoffe *et al.* (2000)]。4C データの効率的なデータ取得が可能となったことから、P-S 変換波を用いた浅部ガス層下のイメージング精度向上、岩相識別、貯留層内流体情報の抽出、S 波スプリティングを用いたフラクチャー分布推定などの貯留層物性解析技術が大きな発展を遂げている。

2.3 探査からモニタリングへ

炭化水素の生産過程において、同一地点で数ヶ月から数年の時間間隔で地震探査を繰り返し実施し、貯留層内の流体移動を把握する手法 (time-lapse seismic survey) が近年盛んに行われている。特に3次元地震探査を繰り返す手法は4次元地震探査 (4D seismic survey) と呼ばれ、貯留層内の流体の飽和度や圧力の変化を3次元的に把握できる有望な技術である [Lumley (2001), Calvert (2005)]。

4D を可能にする要素技術には以下があげられる。

- ・震源性能の向上と波形制御による再現性の向上
- ・データ取得時におけるQC(Quality Control:品質管理)
- ・空間的に高密度なデータの取得と処理
- ・コントロール・ポイントおよびキャリブレーションとしての検層データの活用

過去に実施された地震探査データの再解析も実施され、cross equalization と呼ばれる再現性指標の評価とその補償処理を行うことにより、仕様も精度も異なるデータから定量的な比較が可能な同質の解析結果を得ることが可能である [Johnston *et al.* (2000), Rickett and Lumley (2001)]. モニタリングにおける観測の再現性の向上には、前述した海底に設置した 4C の OBC や OBS が有効である。また、陸上でもモニタリングに特化した埋設型の震源および受振器が開発されている [Meunier (2000), CGG (2002)].

今後も炭化水素、CO₂、熱水など地殻内流体挙動のモニタリングは重要性を増すと考えられる。微小な物性変化は新たな散乱源の発生と等価であり、散乱波解析 [三ヶ田 (1998)] の今後の発展が期待される。

2.4 地震学における反射法の可能性

地震波および地震動の理解には、震源特性に加えて (1) 震源付近、(2) 伝播経路上、(3) 観測点付近のそれぞれの地盤構造と物性の情報が必要である。特に (1) と (3) については反射法地震探査の貢献が期待できる。1995 年の兵庫県南部地震以後、堆積平野の構造探査が数多く実施された。また、活断層やプレート境界など震源域の調査に反射法探査が適用されてきている。

例えば、沈み込み帯では、これまでに資源探査、付加体形成過程やメタンハイドレート成因の解明などを目的として反射法地震探査が多く行われたが、海溝型地震の震源の理解にも適用されつつある。佐伯・他 (2006) は東海沖の 3 次元調査から過去の海底谷と扇状地の堆積と変形の過程を明らかにした。Moore *et al.* (2007) は熊野灘沖の付加体内の 3 次元構造を詳細に明らかにし、分岐断層の生成の地質学的解釈を可能にした。いわゆるアスぺリティ域と準静的すべり域における反射強度の違い [例えば Fujie *et al.* (2002)] に着目し、Sato *et al.* (2005) は東京湾下のフィリピン海プレートのアスぺリティの可能性を示唆している。

反射法は物性の議論も可能にした。AVO 解析は COCORP (Consortium for Continental Reflection Profiling: 米国における深部地殻構造探査プロジェクト) でも岩相解釈に用いられた [Pratt *et al.* (1993)]. 朴・他 (2001) は南海トラフの反射法データに AVO 解析を適用し、沈み込みに伴うデコルマ面の AVO 応答の変化から地質構造と固着過程の関連について考察した。反射波振幅の

分布からデコルマ面の密度と孔隙率を推定した先行研究 [Shipley *et al.* (1994)] を受けて、Tsuji *et al.* (2005) は、3 次元探査で得られたデコルマ面内の地震波アトリビュートの分布からデコルマの変形様式、摩擦特性や流体圧について論じた。

Tsuru *et al.* (2005) は 2003 年十勝沖地震の前後に震央域で反射法探査を実施した。震源近傍で反射波の空間分布の時間変化を捉え、パッチ状の流体移動を仮定して透水係数やせん断応力の変化を見積もった。

これらの研究に見られるように、反射法探査によりプレート境界や断層の位置や地質構造はもちろんのこと、物性や流体の状態についての情報が得られる。さらに、それらの時間変化の検出も可能となると期待される。

これまで反射法の探査深度は震源域に届かないと考えられてきた。2005 年に Western GECO 社はスマトラ島沖において、10,000 in³ の大容量エアガンと長さ 12 km のストリーマケーブルを使用して 2 次元調査を行い [Singh *et al.* (2006)], プレート境界に対応する反射面を深度 50 ~ 60 km まで高分解能で追跡することに成功した。このように、プレート境界の巨大地震発生域は反射法の探査領域内に入ったと言える。

§ 3. 今後注目される解析手法

3.1 波形インバージョン

波形インバージョンは、観測された地震波形を入力データとして扱い、目的とする物性量の分布を高精度・高分解能で求める手法である [土家 (1997)]. 数学的には非線形最小二乗法を用いた逆問題であり、順問題 (波動場モデリング) とモデル修正を反復させて波形のフィッティングを行う。物理的には重合前深度マイグレーションと物性値へのスケールリングにより逆散乱問題を解くことに相当する。Fig. 1 に散乱波動場の逆伝播により散乱点を同定する波形インバージョンの概念を示す。

逆問題は弾性体では密度および Lamé 定数あるいは V_p 、 V_s を目的量として定式化される [Tarantola (1984a), Mora (1987), Pratt and Worthington (1990b)] が、音響波問題に近似して V_p 分布を再構成する手法 [Tarantola (1984b), Pratt and Worthington (1990a)] が一般的である。非弾性減衰 [Liao and McMechan (1996), Charara *et al.* (2004) など] や異方性 [Barnes *et al.* (2004) など] を含めた手法も研究されている。ただし、目的パラメータの選択や感度についてさらなる検討が必要である。

Ravaut *et al.* (2004), Brenders and Pratt (2007) は反射法探査データ解析における波形インバージョンの適用性と優位性を示した。本格的な実用はこれからであるが、す

Fig. 1. The schematic explanation of waveform inversion as a back-scattering problem. (a)–(c) The incident wave from a source hits a scatterer and generates a scattered wave. (d) The scattered waves are back-propagated from the receivers. (e) They focus at the scatterer. Therefore, (f) cross-correlation with the incident wave forms an image of the scatterer. In waveform inversion, the difference between the true model and the current model behaves as scatterers.

で海上探査 MCS データ [Shipp and Singh (2002)], エアガンー OBS データ [Dessa *et al.* (2004)] の解析に適用されており, 後者は南海トラフにおける沈み込みと付加体の構造を得ることに成功した。

波動場モデリングに膨大な計算機資源が必要なこともあり, 3次元の波形インバージョンはまだ実用的でない。また, 現段階の地表地震探査データへの適用例は音響場問題に関する解析に止まっており, 弾性場問題への展開を含め前処理や解析手法などの研究の進展が期待される。

3.2 仮想震源法

Claerbout (1968) は水平成層への波動の垂直入射に関して, 地表で観測した透過応答の自己相関が反射応答と等価であることを示した。Wapenaar (2003), Wapenaar *et al.* (2004) はこれを3次元に拡張し, 2点で観測された地震波形の相互相関により, 一方の受振点を仮想的な震源としてもう一方の受振点で観測した地震波形を得ることを示した。この方法に基づけば, 人工震源を用いずに受振点の観測記録のみから擬似的に反射法記録を得ることが可能である。Schuster *et al.* (2004) はこの概念が反射法を含む種々のイメージングに適用可能であり, 物理的には地表におけるゴースト波を抽出することと等価であ

ることを示した。

Bakulin and Calvert (2004, 2006) はほぼ同じ手法を仮想震源法と呼び, 地表震源と孔内受振器を用いて取得した記録から仮想的に孔内震源の記録を合成し, 複雑な浅部構造による波形の品質の低下と環境変動の影響を除去したイメージングおよびモニタリングを行うことを提案している。また, P波震源を用いて取得した記録から仮想S波震源による記録を得ている [Bakulin *et al.* (2006)]。Fig. 2 に仮想震源法 (相互相関解析) による反射記録作成の概念を示す。

地球科学への適用として, 人工震源の導入が困難な火山地域の構造探査 [筒井・他 (2004)] や人工震源によるエネルギー透過が困難な深部の構造探査 [Abe *et al.* (2007)] が検討されている。微動あるいは自然地震記録を用いたモニタリングへの利用も含め, 理論的, 実用的展開がめざましい研究分野である。

謝 辞

本稿の執筆を助めていただいた60周年記念号編集委員の皆様へ感謝いたします。京都大学大学院工学研究科の松岡俊文, 三ヶ田 均, 辻 健の各氏には執筆に際しご助言ご教示をいただきました。2名の査読者および編

Fig. 2. The schematic explanation of virtual source method (seismic interferometry). (a) Virtual source using receivers in a well to avoid heterogeneous near-surface layers and to obtain reflected signals from the deeper targets [Bakulin and Calvert (2004)], (b) seismic interferometry for teleseismic waves to obtain pseudo-reflection records from surface-related multiple-reflections via cross-correlation [modified from Abe *et al.* (2007)].

集担当委員のコメントは原稿の改善に役立ちました。ここに感謝申し上げます。

文 献

Abe, S., E. Kurashimo, H. Sato, N. Hirata, T. Iwasaki, and T. Kawanaka, 2007, Interferometric seismic imaging of crustal structure using scattered teleseismic waves, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L19305, doi: 10.1029/2007GL030633.

Alsos, T., A. Eide, D. Astratti, S. Pickering, M. Benabentos, N. Dutta, S. Mallick, G. Schultz, L. den Boer, M. Livingstone, M. Nickel, L. Sonneland, J. Schlaf, P. Schoepfer, M. Sigismundi, J. C. Soldo, and L. K. Stronen, 2002, Seismic applications throughout the life of the reservoir, *Oilfield Review*, Summer, 48-65.

Bakulin, A. and R. Calvert, 2004, Virtual Source: New method for imaging and 4D below complex overburden, Expanded

Abstracts, SEG 74th Annual International Meeting, 2477-2480.

Bakulin, A. and R. Calvert, 2006, The Virtual Source method: theory and case study, *Geophysics*, **71**, SI139-SI150.

Bakulin, A., A. Mateeva, R. Calvert, P. Jorgensen, and J. Lopez, 2007, Virtual Shear Source makes shear waves with airguns, *Geophysics*, **72**, A7-A11.

Barley, B. and T. Summers, 2007, Multi-azimuth and wide-azimuth seismic: Shallow to deep water, exploration to production, *Leading Edge*, **26**, 450-458.

Barnes, C., M. Charara, and T. Tsuchiya, 2004, Full-wave anisotropic elastic inversion of synthetic crosswell seismic data, Expanded abstracts, SEG 74th Annual International Meeting, 1826-1829.

Benabentos, M., F. Ortigosa, N. Moldoveanu, and P. Munoz, 2006, Cascaded sweeps – A method to improve vibroseis acquisition efficiency : A field test, *Leading Edge*, **25**, 693-697.

Biondi, B., 2006, 3D Seismic Imaging, Society of Exploration Geophysicists.

Biot, M. A., 1956a, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**, 168-178.

Biot, M. A., 1956b, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**, 179-191.

Brenders, A. J. and R. G. Pratt, 2007, Full waveform tomography for lithospheric imaging: results from a blind test in a realistic crustal model, *Geophys. J. Int.*, **168**, 133-151, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03156.x.

Calvert, R., 2005, 4D technology: where are we, and where are we going?, *Geophys. Prosp.*, **53**, 161-171, doi:10.1111/j.1365-2478.2004.00469.x.

Castagna, J. P. and H. W. Swan, 1997, Principles of AVO crossplotting, *Leading Edge*, **16**, 337-342.

CGG, 2002, SeisMovie aims to be a blockbuster for 4D seismic reservoir monitoring, *First Break*, **20**, 108-110.

Charara, M., C. Barnes, and T. Tsuchiya, 2004, Crosswell seismic data tomography for heterogeneous viscoelastic media, Expanded Abstracts, SEG 74th Annual International Meeting, 1822-1825.

Claerbout, J. F., 1968, Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, **33**, 264-269.

Cohen, J. K. and J. W. Stockwell, Jr., 2008, CWP/SU: Seismic Unix Release 41: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Dessa, J., S. Operto, S. Kodaira, A. Nakanishi, G. Pascal, J. Virieux, and Y. Kaneda, 2004, Multiscale seismic imaging of the eastern Nankai trough by full waveform inversion, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18606.

Fujie, G., J. Kasahara, R. Hino, T. Sato, M. Shinohara, and K. Suyehiro, 2002, A significant relation between seismic activities and reflection intensities in the Japan Trench region, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1100, doi:10.1029/2001GL013764.

Gassmann, F., 1951, Über die Elastizität poröser Medien, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in*

- Zurich, **96**, 1-23.
- Hoffe, B. H., L. R. Lines, and P. W. Cary, 2000, Applications of OBC recording, *Leading Edge*, **19**, 382-391.
- 稲盛隆穂・羽藤正実・佐伯龍男, 2006, 地震波属性を用いたメタンハイドレート賦存層抽出の試み, *石油技術協会誌*, **71**, 34-43.
- 岩崎貴哉・佐藤比呂志, 2009, 陸域制御震源地震探査から明らかになりつつある島弧地殻・上部マントル構造, *地震*, **2**, **61**, S165-S176 (本特集号).
- Johnston, D. H., J. E. Eastwood, J. J. Shyeh, R. Vauthrin, M. Khan, and L. R. Stanley, 2000, Using legacy seismic data in an integrated time-lapse study: Lena Field, Gulf of Mexico, *Leading Edge*, **19**, 294-302.
- 小平秀一, 2009, 日本周辺沈み込み帯での海域地下構造探査—海溝域地震発生帯と海洋性島弧生成に関する最新の成果から—, *地震*, **2**, **61**, S155-S163 (本特集号).
- Liao, Q.-B. and G. A. McMechan, 1996, Multifrequency viscoacoustic modeling and inversion, *Geophysics*, **61**, 1371-1378.
- Lumley, D. E., 2001, Time-lapse seismic reservoir monitoring, *Geophysics*, **66**, 50-53.
- Lynn, H. B., K. M. Simon, C. R. Bates, and R. Van Dok, 1996, Azimuthal anisotropy in P-wave 3-D (multiazimuth) data, *Leading Edge*, **15**, 923-928.
- Mavko, G., T. Mukerji, and J. Dvorkin, 1998, *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University Press.
- Meunier, J., 2000, A new seismic look at reservoir monitoring, *Extended Abstracts, EAGE 62nd Annual Conference*, A-9.
- 三ヶ田 均, 1998, 弾性波散乱現象と物理探査, *物理探査*, **51**, 522-530.
- Moore, G. F., N. L. Bangs, A. Taira, S. Kuramoto, E. Pangborn, and H. J. Tobin, 2007, Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation, *Science*, **318**, 1128-1131, doi:10.1126/science.1147195.
- Mora, P., 1987, Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multioffset seismic data, *Geophysics*, **52**, 1211-1228.
- Ostrander, W. J., 1984, Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence, *Geophysics*, **49**, 1637-1648.
- 朴 進午・鶴 哲郎・濱嶋多加志・金田義行・平 朝彦・倉本真一・EW9907/08 航海乗船研究者, 2001, 南海トラフ反射法地震探査データの AVO 解析, *地学雑誌*, **110**, 510-520.
- Pratt, T., J. Mondary, L. Brown, N. Christensen, and S. Danbom, 1993, Crustal structure and deep reflector properties: Wide angle shear and compressional wave studies of the midcrustal Surrency bright spot beneath southeastern Georgia, *J. Geophys. Res.*, **98** (B10), 17723-17735.
- Pratt, R. G. and M. H. Worthington, 1990a, Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography I: Acoustic wave-equation method, *Geophys. Prosp.*, **38**, 287-310.
- Pratt, R. G. and M. H. Worthington, 1990b, Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography II: Elastic wave-equation method, *Geophys. Prosp.*, **38**, 311-329.
- Ravaut, C., S. Operto, L. Imbrota, J. Virieux, A. Herrero, and P. Dell'Aversana, 2004, Multiscale imaging of complex structures from multifold wide aperture seismic data by frequency domain full-waveform tomography: Application to a thrust belt, *Geophys. J. Int.*, **159**, 1032-1056.
- Ren, J.-X., C. Gerrard, J. McClean, and M. Orlovich, 2005, Prestack wave-equation depth migration in VTI media, *Leading Edge*, **24**, 618-620.
- Rickett, J. E. and D. E. Lumley, 2001, Cross-equalization data processing for time-lapse seismic reservoir monitoring: A case study from the Gulf of Mexico, *Geophysics*, **66**, 1015-1025.
- 佐伯龍男, 1999, Seismic Un*x (SU) 入門 (2) —データ処理の実例 (1), データ入力とトレースヘッダの設定—, *物理探査*, **52**, 465-476.
- 佐伯龍男・稲盛隆穂・高野 修, 2006, 熊野海盆北縁部における三次元地震探査, *物理探査*, **59**, 249-260.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, T. Iwasaki, T. Ito, K. Kasahara, T. Ikawa, S. Abe, T. Kawanaka, M. Matsubara, R. Kobayashi, and S. Harder, 2005, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, **309**, 462-464.
- Schuster, G. T., J. Yu, J. Sheng, and J. Rickett, 2004, Interferometric/daylight seismic imaging, *Geophys. J. Int.*, **157**, 838-852, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02251.x.
- Shipp, T. H., G. F. Moore, N. L. Bangs, J. C. Moore, and P. L. Stoffa, 1994, Seismically inferred dilatancy distribution, northern Barbados Ridge decollement: Implications for fluid migration and fault strength, *Geology*, **22**, 411-414.
- Shipp, R. M. and S. C. Singh, 2002, Two-dimensional full wavefield inversion of wide-aperture marine seismic streamer data, *Geophys. J. Int.*, **151**, 325-344.
- Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppflitz equations, *Geophysics*, **50**, 609-614.
- Singh, S., 2006, Seismic investigation of the Great Sumatra-Andaman earthquake, *First Break*, **24**, December, 37-40.
- Stockwell, Jr. J. W., 1997, Free software in education: A case study of CWP/SU Seismic Un*x, *Leading Edge*, **16**, 1045-1049.
- Stockwell, Jr. J. W., 1999, The CWP/SU: Seismic Un*x package, *Computers & Geosciences*, **25**, 415-419.
- 高野 修・荒戸裕之・中西健史・松岡俊文・佐伯龍男, 2006, 三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学, とくに堆積学分野へのインパクト, *物理探査*, **59**, 225-231.
- Taner, M. T., F. Koehler and R. E. Sheriff, 1979, Complex seismic trace analysis, *Geophysics*, **44**, 1941-1963.
- Tarantola, A., 1984a, Linearized inversion of seismic reflection data, *Geophys. Prosp.*, **32**, 998-1015.
- Tarantola, A., 1984b, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, **49**, 1259-1266.
- 土家輝光, 1997, フルウェーブ・トモグラフィの解析法, *物理探査*, **50**, 444-459.
- Tsuji, T., T. Matsuoka, Y. Yamada, Y. Nakamura, J. Ashi, H. Tokuyama, S. Kuramoto, and N. Bangs, 2005, Initiation of plate boundary slip in the Nankai Trough off the Muroto peninsula, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12306, doi:10.1029/2004GL021861.
- Tsuru, T., J.-O. Park, Y. Kido, A. Ito, Y. Kaneda, T. Yamada, M. Shinohara, and T. Kanazawa, 2005, Did expanded porous patches guide rupture propagation in 2003 Tokachi-oki

- earthquake?, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20310, doi:10.1029/2005GL023753.
- 筒井智樹・松島 健・清水 洋, 2004, 雲仙火山の浅部構造に対する擬似反射記録法の適用の試み, *火山*, **49**, 143-151.
- Wapenaar, K., 2003, Synthesis of an inhomogeneous medium from its acoustic transmission response, *Geophysics*, **68**, 1756-1759, doi:10.1190/1.1620649.
- Wapenaar, K., J. Thorbecke, and D. Draganov, 2004, Relations between reflection and transmission responses of three-dimensional inhomogeneous media, *Geophys. J. Int.*, **156**, 179-194, doi: 10.1111/j.1365-246X.2003.02152.x.
- 渡辺俊樹, 1999a, Seismic Un*x (SU) 入門 (1) - 概要・入手から導入まで -, 物理探査, **52**, 274-286.
- 渡辺俊樹, 1999b, 新 SU ユーザー・マニュアル (訳), <<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/watanabe/works/su/sumanual-2.5j1.0.pdf>>, (参照 2008-08-28).
- Yilmaz, O., 2001, Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists.

付録 反射法データ解析ソフトウェア

反射法探査のデータ解析には商用ソフトウェアが使用されるが、研究用としてフリーのパッケージもいくつか利用できる。その中で最も普及し高い評価を受けているものに Seismic Un*x (CWP/SU, 以下本稿では SU) が³ある [Cohen and Stockwell (2008)]。SU は Colorado School of Mines の Center for Wave Phenomena で開発、蓄積されたプログラムをパッケージ化したものである。SU に関しては Stockwell (1997, 1999), 渡辺 (1999a), 佐伯 (1999) に詳しい。パッケージに詳細なマニュアルが³附属しており、古いのが日本語訳 [渡辺 (1999b)] もある。

SU は Unix 環境で反射法地震探査のデータ解析を行うプログラム群として機能する。一般のコマンドと同様に、コマンドライン上で、あるいはシェルスクリプトに記述して使用し、データの入出力には標準入出力を使用するため、なじみやすい。Table A-1 に SU に含まれているツールの機能の一覧を示す。通常の時系列データ処理や反射法データ解析に必要なプログラムが揃っており、2次元の (工夫次第では3次元の) 調査データの解析を行う能力を有している。マイグレーション/イメージングが豊富なのは CWP の研究動向を反映しているためであろう。

SU は反射法探査のために設計されているため、地震

学での構造探査データや自然地震データを使用する場合に、注意や工夫が必要な点を参考までに挙げておく。

- ・データフォーマットが SEG-Y (地震探査における標準フォーマット) をベースとしている。
- ・1 トレースに含まれるサンプル数の最大が $2^{15} = 32768$ (SEG-Y の規格による制限)。
- ・受振点配置が測線上で等間隔であることを前提にしたプログラムがある (トレースの内挿は可能)。
- ・空間座標系として緯度経度を直接扱えない。

フリーなソフトウェアには、他にも Stanford Exploration Project が³作成、公開している SEPlib および SEPlib3D, 元 Amoco 社の技術陣が社内コードを公開した FreeUSP などがある。それぞれに特徴や共通点があり、詳細は下記のサイトを参照いただきたい (参照 2008-08-28)。

[Seismic Un*x] <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>

[SEPlib] <http://seplib.stanford.edu/>

[FreeUSP] <http://www.freeusp.org/>

Table A-1. Functional description of the tools included in SU package.

Core Seismic Unix Programs
Reading and writing data to and from tapes Data format conversion Trace header manipulation, etc.
Viewing Data
X-windows/PostScript plotting Trace picking
Transform and Filtering Operations
Hilbert transform, trace attributes Radon transform, tau-p filtering 1D/2D filtering operations
Seismic Modeling Utilities
Model building Synthetic data generators
Seismic Processing Utilities
Standard processes Stacking data Velocity analysis Normal moveout / dip moveout correction Seismic prestack/poststack migration