— 原著論文 —

大規模屈折法・広角反射法探査データを用いた走時解析手法とソフトウェア

藤江 剛^{1a*}

屈折法・広角反射法構造探査データを用いた走時解析は、リソスフェアの地震波速度構造の不均質性をイメージングする効果的な手段である。しかし、構造解析は非線形性が強い問題であることもあり、伝統的に試行錯誤的、主観的な解析アプローチを取らざるを得ず、客観的なモデルを得ることが難しかった。近年の観測の大規模化、高密度化により得られる大量のデータのお陰で、主観的な作業を大幅に減らした解析アプローチが採用できるようになり、客観的で信頼性の高い構造モデリングが可能になってきた。本論文では、大規模探査データを用いた構造モデリング手法の概要について、海洋研究開発機構が開発・採用している解析手法やソフトウェアを中心に紹介する。

キーワード：屈折法探査，構造解析，走時，方法論

2009年2月16日受領；2009年7月16日受理

1 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター

現在の所属

a：独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

代表執筆者：

藤江 剛

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25

045-778-5432

fujie@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Original Paper —

Modeling strategies and tools for a large amount of wide-angle seismic traveltime data

Gou Fujie^{1*}

The wide-angle seismic reflection/refraction data analyses play important roles in determining lithospheric scale crustal structures and understanding tectonic processes in the lithosphere. The structure analysis is an intrinsically nonlinear and often an underdetermined problem. Therefore, several subjective analysis processes are usually required for modeling lithospheric scale structure. Generally, subjective analysis processes reduce the credibility of the resultant models and we cannot discuss fine variation of the obtained structure models. Recently, the increasing the quality and quantity of the seismic data as well as the increasing the computer power has enabled us to apply advanced and objective structure analysis approaches and to discuss the detailed structure variation. In this paper, I show my developed and adopted structure analysis approaches and software tools for constructing the lithospheric scale crustal structure models objectively.

Keywords : wide-angle seismic survey, structure modeling, traveltime, methodology

Received 16 February 2009 ; Accepted 16 July 2009

1 Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Corresponding author :

Gou Fujie

Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan

+81-45-778-5432

fujie@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. Introduction

日本列島周辺では、日本海溝域や南海トラフ域といったプレート沈み込み帯や、日本海東縁などの歪集中帯において、人的、社会的被害を伴った大地震が繰り返し発生している。このような大地震を含む地球表層のダイナミクスを理解するためには、リソスフェアの構造を把握することが必要不可欠である。

屈折法・広角反射法構造探査の走時データを用いた地震波速度構造モデリングは、リソスフェアの構造不均質を詳細にイメージングするもっとも効果的な手段である。近年では、観測システムや計算機の発達にともない、より高い解像度でモデリングできる波形インバージョンなどの波形を用いた解析手法も実用化されつつあるが(たとえば Pratt, 1999)、波形解析の適用には予め走時解析によって適切な速度構造モデルを推定しておく必要があるため、今後も走時を用いた構造解析の重要性は変わることはないだろう。

走時を用いた2次元速度構造解析は、約30年前に波線追跡法を用いた走時・波線計算手法が実用化された頃から本格的に実施されるようになった(たとえば, Červený et al., 1977)。当初は、試行錯誤的に速度構造モデルを構築するフォワードモデリングアプローチが採用されていたが、大規模探査の膨大なデータを試行錯誤的に処理することが非現実的になってきたとともに、解析者の主観に強く支配される試行錯誤的モデリングの問題点が指摘されるようになったため、次第にインバース解析が採用されるようになってきた(たとえば Zelt and Smith, 1992)。

しかし、たとえインバース解析を採用した場合でも、フェーズの同定に代表されるような解析者の解釈に強く依存する主観的な解析プロセスが含まれる場合は、モデリング結果は解析者の主観に依存することになる。当然、誤った解釈(主観)に基づく解析結果は、誤った構造モデルに陥るため、主観的な解析プロセスが含まれる場合には、結果モデルの信頼性や解像度を客観的に評価することが困難になってしまう(Zelt, 1999)。したがって、客観性・信頼性の高い構造モデルを構築するには、できるだけ主観的な解析プロセスを排除する必要がある(Zelt et al., 2003)。

従来、主観的な解析プロセスが採用されてきたのは、データの不足を解析者の主観で補うというのも主要な理由の一つであった。この十年で、特に海洋における構造探査は飛躍的に大規模、高密度化され、高品質で大量のデータが取得できるようになっており、従来の主観的な解析プロセスに代えてより客観的な解析プロセスも選択できるようになってきた。本論文では、近

年の大規模構造探査データによる構造モデリングの概要について、海洋研究開発機構で開発した解析手法や解析ソフトウェアを中心に紹介する。

2. Methods

2.1. Velocity structure model

地震波速度構造解析は、モデルパラメタリゼーションの視点から二つに分けられる。一つは層構造モデルパラメタリゼーションを採用する方法で、もう一つは、構造を細かな格子状に分割し、各格子点(あるいは格子)に速度値を与えるグリッド型モデルパラメタリゼーションを採用する方法である。

前者の場合、構造を多層に分割すること、およびフェーズの同定(個々の観測フェーズが、どの層からの反射波・屈折波であるのかを解釈する作業)という二つの極めて主観的な解析プロセスが必要となる。層数や層厚が不適切であったり、フェーズの同定が誤っている場合には、必然的に誤った構造モデルに陥る。したがって、層構造モデルパラメタリゼーションを採用した解析結果は、客観性・信頼性が低いという問題が指摘されている(Zelt et al., 2003)。

一方、後者の場合、モデルパラメタリゼーションに関する主観性は極めて小さい。ただし、層を定義しないため反射波走時などを解析に取り入れることができず、必然的に初動走時のみを使った解析になる。したがって、このアプローチに基づくインバース解析は初動走時トモグラフィと呼ばれる(たとえば Zelt and Barton, 1998; Zhang and Toksoz, 1998; Fujie et al., 2006)。初動走時トモグラフィはもっとも主観性が小さいフェーズ(初動)と、客観性の高いモデルパラメタリゼーションを採用しているため、層構造モデルパラメタリゼーションを採用した解析手法と比較して、モデリング結果は客観的で信頼性が高い。

しかし、初動走時トモグラフィは、データを初動に限定している上、グリッド構造であるためにモデルパラメータ量が多く、結果として underdetermined な問題となりがちである。そのため、初動トモグラフィが実際のデータ解析に適用できるようになったのは、観測が大規模、高密度化し多量のデータが得られるようになった最近のことである。現在、海洋研究開発機構では、大規模・高密度な探査データを生かし、主に初動走時トモグラフィを用いて地震波速度構造モデルを構築している。

2.2. Traveltime mapping method

初動走時トモグラフィは、客観的に速度構造の不均

質性をモデル化できる。しかし、初動(屈折波)は構造境界面(速度ギャップ)などの短波長の構造不均質に鈍感であるため、たとえ解像度が高い範囲でも、初動トモグラフィの結果モデルでは短波長な不均質構造はスムージングされ、長波長の構造不均質性しか表現できない(Fig. 1c,d)。そのため、地震断層面やプレート境界面のような構造境界面の位置・形状を議論するには、別のアプローチが必要となる。そこで私が開発したのが走時マッピング手法(Traveltime mapping method)である。

走時マッピング手法とは、時間断面上の走時データを、重合前深度マイグレーションと同じ原理に基づいて、深度断面に投影(マッピング)するというものである(Fujie et al., 2006)。走時を深度断面に投影すると、反射波走時の場合は当該反射面に集束する一方で、屈折

波走時はまったく収束しないという性質がある。少量の走時を投影しただけでは有意な投影図は得られないが、近年の大規模探査で得られる多数の走時データを投影することにより、自動的に反射面が炙り出される形で構造境界のイメージングができる(Fig. 1e)。この際、フェーズの同定をする必要は一切なく、観測されたフェイズの走時を機械的に投影するだけでよい。

本手法では、投影する際にマイグレーション速度構造が必要となる。当然、不適切な速度構造モデルを用いると誤った投影結果となるが、構造境界のような短波長不均質までを正確にモデル化した構造は必要ではなく、初動走時トモグラフィによる速度構造モデルが十分に優れたマイグレーション速度構造となることが数値実験により確認されている(Fujie et al., 2006; Fig. 1)。すなわち、初動走時トモグラフィの結果と充分な量の

Fig.1. Numerical experiments of the first arrival tomography and the traveltime mapping (modified from Fujie et al., 2006). (a) True model based on the actual experiment in the Japan Trench subduction zone. The interface 5 is the plate boundary. I first calculated traveltimes of first arrivals and reflections from seven reflectors in the true model, and added realistic random errors to traveltimes. (b) A simple, starting model for the first arrival tomography. (c) P-wave velocity structure model obtained by first arrival tomography, and (d) Diagonal elements of the resolution matrix. In the well-resolved region (white and light gray region), a long-wavelength variation in P-wave velocities is correctly modelled, but structure boundaries are not imaged at all. (e) Mapping result using (c) model. Structure boundaries are clearly imaged.

走時データさえあれば、フェイズの同定や試行錯誤的なモデリングといった主観的な解析プロセスを経ずに、走時マッピング手法により機械的・客観的に構造境界面がイメージングできることになる。

初動走時トモグラフィと走時マッピング手法の組み合わせは、従来の層構造モデルパラメタリゼーションを採用した走時インバージョンアプローチ(たとえば Zelt and Smith, 1992)と比較すると、構造を成層構造に分割する作業やフェイズの同定といった極めて主観的で、しかも結果に決定的な影響を及ぼす解析プロセスを含んでいないため、より客観性が高い構造モデリングアプローチである。もちろん、初動走時トモグラフィと

走時マッピングの組み合わせにおいても、走時ピックや、トモグラフィの初期構造の構築といったプロセスに解析者の主観が入る余地が残ってはいるが、不明瞭なフェイズのピックを避け、より単純な初期構造を選択することにより、主観の混入を減じることができる。

このように、初動走時トモグラフィと走時マッピング手法の組み合わせは、リソスフェアスケールの地殻構造の不均質性を客観的に把握するのに極めて有効な手段であり、数多くの研究で成果をあげている(たとえば Ito et al., 2004, 2005; Kodaira et al., 2006)。

Fig.2. An interactive software tools for wide-angle seismic data, PASTEUP.

3. Software tools

大規模・高密度な構造探査で得られる大量のデータを、初動走時トモグラフィと走時マッピング手法で解析することにより、地震波速度構造モデルや構造境界面形状を従来のアプローチよりも客観的に構築できるようになった。ただし、これらの手法を適用するには、予め走時データやトモグラフィ用初期構造モデルを準備する必要があり、解析結果の客観性を確保するには、これらの前処理でも可能な限り主観の混入を減らさなければならない。

走時ピックに伴う主観性を減じるためには、誰が見ても同じように認識できる明瞭なフェイズのみに限定してピックすればよい。しかし、生データはノイズなどの影響で明瞭に読み取れるフェイズは限られるため、効果的なフィルタ(周波数フィルタ、速度フィルタ、デコンボリューションなど)を適用してからピックする必要がある。私が開発している PASTEUP (Fig. 2) は、インタラクティブな屈折法・反射法構造探査データ解析用ソフトウェアであり、大量のデータであっても効率的に走時ピックや効果的なフィルタが適用できるように、(1)対話的な走時ピック機能、(2)高度なフィルタ処理、(3)多数の海底地震計を扱うためのデータベース機能、(4)海底地震計の位置決め、波線追跡計算、走時マッピング計算などを対話的に実行する機能、(5)スクリプト処理で自動化できる機能、などを実装している (Fujie et al., 2008)。PASTEUP を使えば、適切に、効率的に大量のピックをすることができる。

トモグラフィ用初期構造モデルから解析者の主観を排除するには、本来は一次元構造のようにできるだけ単純なものを採用するのが好ましい。しかし、構造解析は本質的に極めて非線型性が強い問題であるため、非線型インバージョン(トモグラフィ)の初期モデルは真のモデルのよい近似でなければならず、特に構造が複雑な浅部については実際の構造に近い不均質性をモデル化する必要がある(たとえば Fig. 1b)。そのためには、反射法解析などの結果を参考にしつつ試行錯誤的なフォワードモデリングにより浅部構造を構築するのがもっともオーソドックスであり、試行錯誤的モデリングに付随する主観を少しでも減じるためには、高密度なデータを使うとともに、試行回数を増やすのが効果的である。MODELING は私が開発しているインタラクティブな速度構造モデリングツールであり (Fujie et al., 2008)、(1)対話的な構造モデル編集機能、(2)編集集中のモデルで計算した走時・波線をオンザフライでプロットする機能、(3)PASTEUP との高い親和性、(4)複数の波線追跡アルゴリズムを実装、などの特徴がある。簡便にモデルが編集

でき、オンザフライで理論走時と観測値を比較できる MODELING を使えば、試行錯誤的モデリングにおける試行回数を簡単に増大でき、適切な初期構造をモデリングしやすくなるだろう。

海洋研究開発機構では、できるだけ主観性が入り込まないように細心の注意を払いつつ、PASTEUP で走時ピック、MODELING で初期構造作成を行い、初動走時トモグラフィと走時マッピング手法によって、客観的で信頼性の高い構造モデルを構築するというアプローチを採用している。

なお、PASTEUP と MODELING は、オープンソースとして公開しており、国内外を問わず、多くの研究所、企業等で利用されている (Fujie et al., 2008)。

4. Conclusions

屈折法・広角反射法構造探査は、リソスフェアの構造不均質をイメージングするもっとも効果的な手段の一つである。しかし、構造解析は本質的に非線型性が強いなど難しい問題であり、従来は解析者の主観的な解釈を補うことによりモデリングせざるを得ない場合が多かった。

近年、構造探査の大規模、高密度化により、高品質なデータが大量に得られるようになってきた。海洋研究開発機構では、大量のデータを生かした走時解析手法や解析ソフトウェアを開発・採用することにより、客観的で信頼性の高いモデルを構築し、リソスフェアの構造研究の発展に貢献している。

しかし、さらに短波長の構造不均質性を解明するには、走時解析だけでは無理であろう。高分解能化するには、より稠密な構造探査を実施するとともに、走時解析の延長上として、波形インバージョン、重合前深度マイグレーション処理などの波形解析を実データに適用していく必要があると考えられる。

引用文献

- Červený, V., I. A. Molotkov and I. Pšenčík (1977): *Ray method in seismology*, Praha, Univ. Karlova.
- Fujie, G., A. Ito, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda (2006), Confirming sharp bending of the Pacific plate in the northern Japan trench subduction zone by applying a raveltime mapping method, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 157, 72–85.
- Fujie, G., J. Kasahara, K. Murase, K. Mochizuki and Y. Kaneda (2008), Interactive analysis tools for the wide-angle seismic data for crustal structure study,

- Exploration Geophysics*, 39, 26–33.
- Ito, A., G. Fujie, S. Miura, S. Kodaira, Y. Kaneda and R. Hino(2005), Bending of the subducting oceanic plate and its implication for rupture propagation of large interplate earthquakes off Miyagi, Japan, in the Japan Trench subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05310,10.1029/2004GL022307.
- Ito, A., G. Fujie, T. Tsuru, S. Kodaira, A. Nakanishi and Y. Kaneda, (2004), Fault plane geometry in the source region of the 1994 Sanriku-oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 163–175.
- Kodaira, S., T. Hori, A. Ito, S. Miura, G. Fujie, J.-O. Park, T. Baba, H. Sakaguchi and Y. Kaneda(2006), A cause of rupture segmentation and synchronization in the Nankai trough revealed by seismic imaging and numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, 111.
- Pratt, R. G.(1999), Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part1: Theory and verification in a physical scale model, *Geophysics*, 64, 888–901.
- Zelt, C. A.(1999), Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data, *Geophys. J. Int.*, 139, 183–204.
- Zelt, C. A. and P. J. Barton (1998), Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin, *J. Geophys. Res.*, 103, 7187–7210.
- Zelt, C. A., K. Sain, J. V. Naumenko and D. S. Sawyer (2003), Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography, *Geophys. J. Int.*, 153, 609–626.
- Zelt, C. A. and R. B. Smith(1992), Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure, *Geophys. J. Int.*, 108, 16–34.
- Zhang, J. and M. N. Toksöz (1998), Nonlinear refraction traveltime tomography, *Geophysics*, 63, 1726–1737.