

「HD(高精細)トモグラフィ」の導入と適用例

佐藤礼*, 山田信人, 土家輝光 (日本地下探査),
Christophe Barnes (Université de Cergy-Pontoise)

Introduction of “High-Definition seismic tomography” and its applications

Rei Sato*, Nobuto Yamada, Terumitsu Tsuchiya (NC Geophysical Survey),
Christophe Barnes (Université de Cergy-Pontoise)

Abstract: Tomographic inversion method is now widely applied in seismic refraction survey for engineering purposes. There remain, however, problems to be solved, for instance in accurate picking of travel-time, in appropriate handling of data-reliability, and in skillful manipulation of uneven spatial illumination. We, therefore, introduce “High-Definition seismic tomography (HD-tomography)” to solve such problems, and numerically study the applicability of the technique for two tough structures. As a result, we observe that the HD-tomography exhibits high performance in the given hard condition.

1. はじめに

トンネルなどの土木地質調査において、弾性波探査(屈折法地震探査)が広く用いられてきた。解析には、萩原の方法を拡張したハギトリ法が古くから成熟した方法として使われている。また、登場から20年ほどが経過した走時トモグラフィ解析もすでに一般的な手法になっている。しかし、初動走時の読取方法や波線密度の不均質性への対処法などにはまだ改良の余地が残っていると考える。例えば、初動走時の読取に関しては、現在においても熟練技術者の経験に頼る場面が多い。データの品質が悪い場合の対処法として、走時の平行性のチェックや往復走時のチェックなどの手法はあるものの、S/N比の高い波形から読み取った走時とノイズにまみれた波形から推定で読み取った走時とを同じ重みで解析に用いる流儀には問題があるはずである。また、(多くの場合にそうであるように)波線密度が空間的に不均質な状況を放置して解析を行うと、初動読取等による誤差が、波線密度が粗になっている部分に集中して悪影響を及ぼし、偽像が発生する(Gheshlaghi and Santamarina, 1998)。そこで我々は、解析精度に影響を与えるこれらの問題点を改善すべく、Tarantola(2005)のInverse Problem Theoryに基礎を置く最新の解析アルゴリズムを導入し、これを走時トモグラフィ解析におけるより高精度な解析技術「HD(High-Definition: 高精細)トモグラフィ*」として適用してゆくこととした。本報告においては、市販の走時トモグラフィ解析ソフトでは難しいとされている2つの速度モデルを用いて数値実験を行い、HDトモグラフィの有用性を検討した。(*HDトモグラフィは日本地下探査の商品名です。)

2. HD トモグラフィの適用

HDトモグラフィは、初動走時の自動読取、読取走時への不確実性の付与、画像ファイルを用いた速度モデルの作成、2D/3Dの初動走時モデリング、およびインバージョンなどの機能を有する。解析精度に影響を与える各問題点への対応は、いずれもミスフィット関数を次式で認識する立場で行っている(Barnes et al., 2005).

$$S(\mathbf{m}) = \Delta \mathbf{d}^T \mathbf{C}_D^{-1} \Delta \mathbf{d} + \Delta \mathbf{m}^T \mathbf{C}_M^{-1} \Delta \mathbf{m} \quad (1)$$

2.1 初動走時の自動読取および不確実性の付与

初動走時の読取は、指定した中心周波数に応じた時間ウィンドウにおいて、複数の方法によって自動で行う。自動読取の例を図2に示す。このとき、各種の読取走時のばらつきを基にして、同時に不確実性を算出する。算出した読取走時の不確実性は、(1)式におけるデータ共分散行列 \mathbf{C}_D として定量化することによって解析に反映させる。

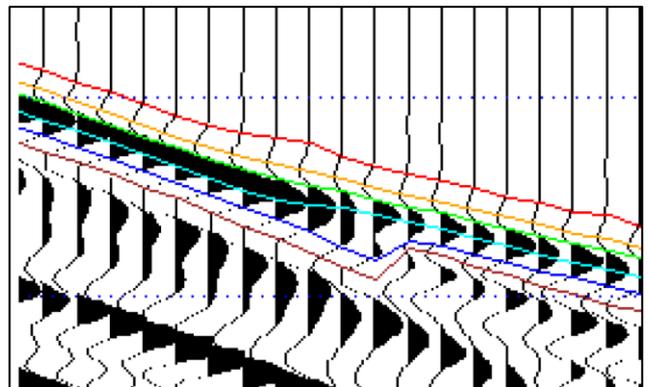


図2. 自動読取の例

2.2 相関距離を導入した速度モデルの修正

解析を安定して進行させるための工夫として、(1)式におけるモデル共分散行列 $C_M (= DRD : D$ は標準偏差を値として持つ対角行列)を、それを構成する相関行列 R に水平方向と垂直方向の相関距離を与える方法で定量的に導入する(Charara et al., 1996). 相関距離は深さとともに滑らかに増大させる要領を保ちつつ、解析の進行とともに狭めてゆく方法で決定する. この手順は可変型の空間的ローパスフィルタを適用することに相当し、走時曲線の全体的な傾向が最初に調整されるため、大きなスケールの構造が初期段階でモデルに現れる. その後相関距離を段階的に小さくすることによって、次第に小さなスケールの構造が現れる. この手法により初期段階での波線の集中が回避でき、後述する波線密度および入射角の平滑化と相まって偽像の低減に効果を発揮する.

2.3 波線密度および入射角の平滑化

波線密度が空間的に不均質な場合、初動読取等による誤差が、波線密度が粗になっている部分に集中し、低速度および高速度の偽像を発生させる. この問題に対し HD トモグラフィでは、速度モデル修正のたびに、それぞれのセルにおける波線数を基にして波線密度および入射角のバランスをとることによって、偽像を低減させる.

3. 速度モデルの設定

HD トモグラフィの有用性を検討するため、2つの速度モデルを用いて数値実験を行うとともに、市販の走時トモグラフィ解析ソフトを2つ選定して同モデルに対する解析を実施し、それぞれの解析結果について再現性を検証・比較した. 作成した2つの速度モデルのうち速度モデル1には、財津・相澤(2010)において示される実調査で遭遇する可能性が高い速度構造の中でも走時トモグラフィ解析の適用性が低いとされた、P波速度3km/sの基盤層が大きな谷型形状を成すモデルを採用した. 速度モデル2には、より複雑な構造として、P波速度3~4km/sの基盤層が大きな凹型形状を成し、その上位層に段違いがあるモデルを採用した. 表1に真の速度モデルおよび初期モデルの概要を示す. 両速度モデルともに、受振器は地表面を模した速度境界に10m間隔で41点設置し、振源は地表面の距離程5m, 102.5m, 200m, 297.5m, 395mの5点に設置した. なお本報告においては、相関距離を導入した速度モデルの修正と波線密度および入射角の平滑化が解析精度に

与える影響のみに着目するため、初動走時の自動読取および読取走時への不確実性の付与は実施していない.

表1. 真の速度モデルおよび初期モデルの概要

モデル		概要
1	真の速度モデル	基盤層が大きな谷型形状を成す
	初期モデル	最下層のP波速度を3.0km/sとして深さとともに速度が増加する構造
2	真の速度モデル	基盤層が大きな凹型形状を成しその上位層に段違いがある
	初期モデル	最下層のP波速度を4.0km/sとして深さとともに速度が増加する構造

4. 解析結果

3.で作成した速度モデルを用いた、各走時トモグラフィ解析ソフトによる解析結果および走時曲線についてそれぞれ特徴を述べる. 図2に速度モデル1, 図3に速度モデル2を示し、それぞれの図のIに真の速度モデル, II~IVに解析結果, i~iiiに観測走時と理論走時を示す.

4.1 速度モデル1による検証・比較

中央部で基盤層が大きな谷型形状を成す速度モデルである.

HD トモグラフィによる解析結果(図2. II)では、大きな谷型形状、谷型形状の肩部分、および基盤層の深度について真の速度モデルに近い構造が得られた. モデルの両端の波線が通らない箇所初期モデルの構造が残っているが、偽像は発生していない.

解析ソフトAによる解析結果(図2. III)では、谷型形状の肩部分についておおよそ真の速度モデルに近い構造が得られた. 一方で、大きな谷型形状について存在を示唆するものの、中央部における基盤層の深度が真のモデルよりも浅い結果となった.

解析ソフトBによる解析結果(図2. IV)では、大きな谷型形状および基盤層の深度についておおよそ真の速度モデルに近い構造が得られた. 一方で、谷型形状の肩部分は真の速度モデルと異なる傾斜を示した. 観測走時と理論走時とを比較すると、RMS残差は比較対象とした解析ソフトの中では最も小さいが、解析結果の所々に低速度の偽像が発生している.

4.2 速度モデル2による検証・比較

中央部で基盤層が大きな凹型形状を成し、その上位層に段違いがある速度モデルである.

HD トモグラフィによる解析結果(図3. II)では、大きな凹型形状、凹型形状の肩部分、および基盤層の深

度について真の速度モデルに近い構造が得られた。上位層の段違い構造は、多少なだらかになってはいるもののおおよそ真の速度モデルに近い構造を示した。

解析ソフト A による解析結果(図 3. III)では、凹型形状の肩部分についておおよそ真の速度モデルに近い構造が得られた。一方で、大きな凹型形状について存在を示唆するものの、基盤層の深度が真の速度モデルよりも浅い結果となった。上位層の段違い構造は、HD トモグラフィによるものよりも、さらになだらかな傾斜構造を示した。

解析ソフト B による解析結果(図 3. IV)では大きな凹型形状、凹型形状の肩部分、および上位層の段違い構造についておおよそ真の速度モデルに近い構造が得られた。一方で、基盤層の深度については真の速度モデルと異なり、波打つような構造を示した。速度モデル 1 と同様に、走時の RMS 残差は比較対象とした解析ソフトの中では最も小さいが、解析結果の所々に低速度および高速度の偽像が発生している。

4.3 検証・比較結果のまとめ

4.1 および 4.2 で実施した、HD トモグラフィおよび市販の走時トモグラフィ解析ソフトによる解析結果の検証・比較のまとめを表 2 に示す。表中の○印は良好な結果であることを示し、△印は解釈に注意が必要な結果、×印は間違った解釈を引き起こし得る結果であることを示す。HD トモグラフィによる解析結果は、総じて速度モデルを正確に再現していることが分かる。また、走時の RMS 残差は比較対象とした全ての解析ソフトで低い値を示したが、その大小が直ちに解析結果の良否を反映するものではないことが分かった。同様のことは杉本(1987)においても指摘されている。

表 2. 解析結果の検証・比較のまとめ

モデル	比較項目	HDトモグラフィ	ソフトA	ソフトB
1	大きな谷型形状	○	△	○
	谷型形状の肩部分	○	○	△
	基盤層の深度	○	×	○
	偽像	○	△	×
	RMS残差(ms)	1.15	1.53	0.26
2	大きな凹型形状	○	△	○
	凹型形状の肩部分	○	△	△
	上位層の段違い構造	○	×	△
	基盤層の深度	○	×	×
	偽像	△	△	×
RMS残差(ms)	1.11	1.26	0.36	

5. まとめと今後の展望

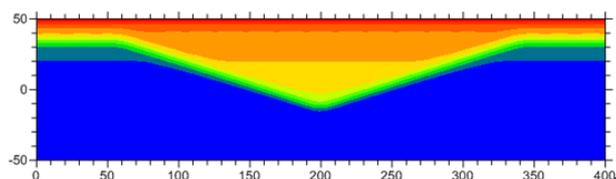
本報告では、走時トモグラフィ解析における高精度な解析技術として HD トモグラフィを導入し、その特徴となる各機能について解説を行った。また、市販の走時トモグラフィ解析ソフトでは難しいとされる 2 つの速度モデルを用いた数値実験を通して、HD トモグラフィの有用性を検討するとともに、それぞれの解析結果の比較を行った。その結果、HD トモグラフィについて、市販の走時トモグラフィ解析ソフトよりも速度モデルの再現性に優れることが確認されたとともに、より複雑な構造にも適用可能であることが示された。

今後は、初動走時の自動読取および読取走時への不確実性の付与が解析精度に与える影響を確認するとともに、3 次元走時トモグラフィ解析についても検討を進めたい。

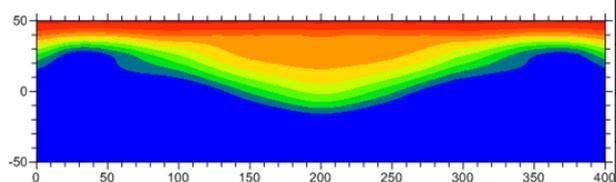
参考文献

- Barnes, C., Gere, C., Clement, F., and Mougnot, J.M. (2011): Diving wave tomography: a robust method for velocity estimation in a foothills geological context, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011, 3953-3957.
- Charara, M., Barnes, C., and Tarantola, A. (1996): Constrained Waveform Inversion of Seismic Well Data, Inverse methods, Lecture notes in Earth Sciences, **63**, 98-112.
- Gheshlaghi, F. and Santamarina, J. C. (1998): Data Pre-Processing in Cross-Hole Geotomography, J. Env. Eng. Geophysics, **3**, 41-47.
- 杉本芳博 (1987) : ジオトモグラフィー画像再生におけるランダムノイズの影響, 物理探査学会第 76 回学術講演論文集, 128-131.
- Tarantola, A. (2005): Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation, Soc. Ind. Appl. Math.
- 財津敏郎・相澤隆生 (2010) : 屈折法弾性波探査における速度構造モデルと走時曲線, 物理探査, **63**, 4, 371-384.

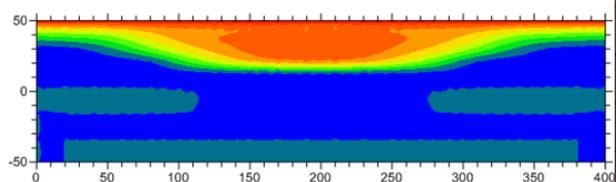
I. 速度モデル



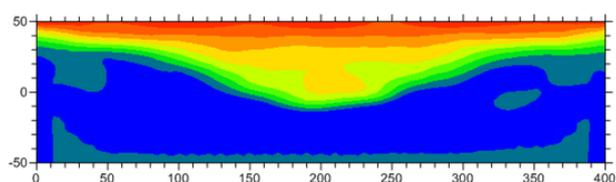
II. HD トモグラフィ解析結果



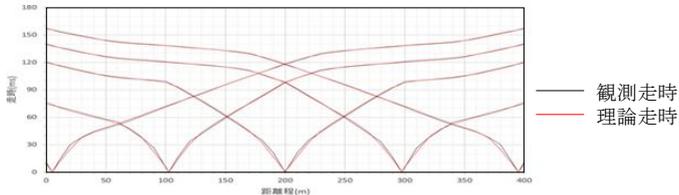
III. ソフト A 解析結果



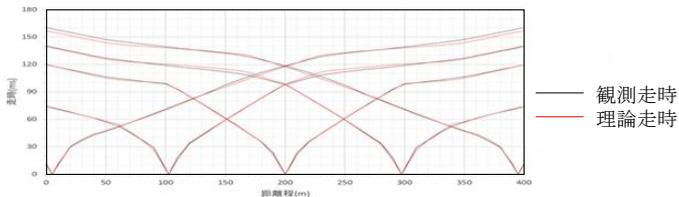
IV. ソフト B 解析結果



i. HD トモグラフィ解析結果



ii. ソフト A 解析結果



iii. ソフト B 解析結果

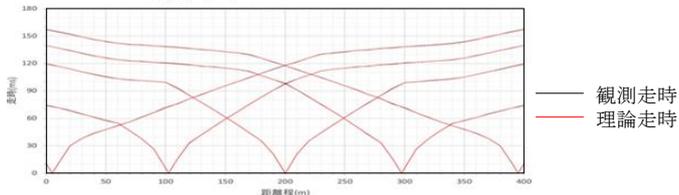
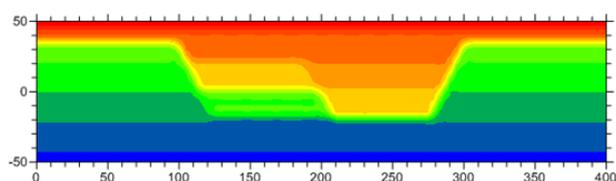
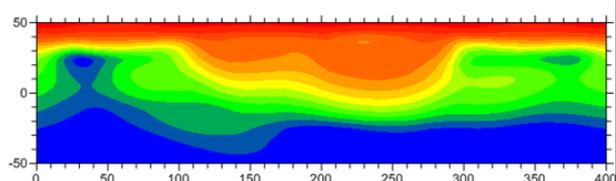


図 2. P 波速度 3km/s の基盤層が大きな谷型形状を成すモデル

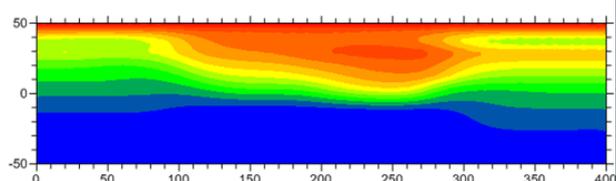
I. 速度モデル



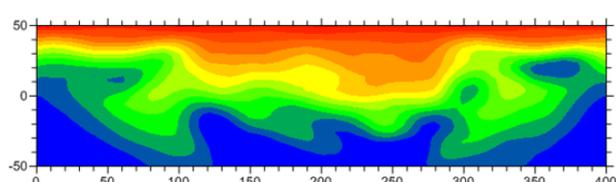
II. HD トモグラフィ解析結果



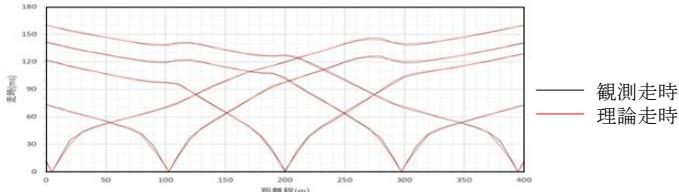
III. ソフト A 解析結果



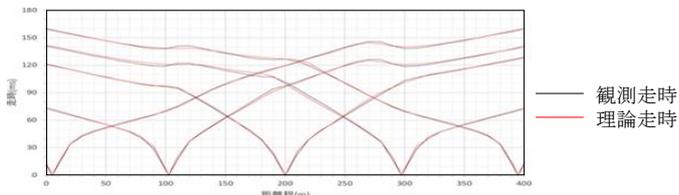
IV. ソフト B 解析結果



i. HD トモグラフィ解析結果



ii. ソフト A 解析結果



iii. ソフト B 解析結果

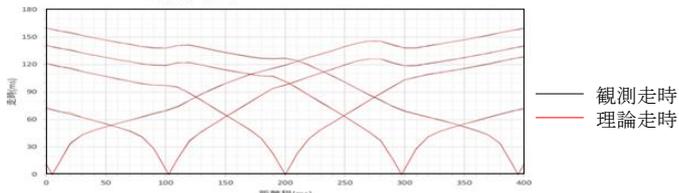


図 3. P 波速度 3~4km/s の基盤層が凹型形状を成し、その上位層に段違いがあるモデル