

屈折及び反射地震トモグラフィの適用性に関する予備検討

今吉隆 (阪神コンサルタンツ)

Preliminary examination on the applicability of seismic refraction and reflection traveltimes tomography

Takashi Imayoshi (Hanshin Consultants)

Abstract: For imaging subsurface velocity structures deeper than those obtained by refraction traveltimes tomography, we are developing refraction and reflection tomography that simultaneously inverts refraction and reflection traveltimes on a regular velocity grid. Our approach to trace reflection raypaths and to calculate reflection traveltimes residuals, is based on a migration velocity analysis concept applied in surface seismic reflection processing. Through preliminary examinations including numerical experiments, we recognize that this method could be considerably robust and applicable, while it requires labor intensive and interpretive processes, and some assignments to be solved before applying it to field datasets are also clarified.

1. はじめに

土木・地球科学分野等において地下の速度分布を把握したいというニーズは依然として高い。このニーズに対して、一般には屈折法(トモグラフィ解析を含む)が適用される。しかし、同手法は探査深度が最大受振距離(オフセット)の1/10~1/5程度に限られる(物理探査学会, 2008)。筆者らは、オフセットに対する探査深度の割合を大きくする手法として、屈折波などの初動走時に加えて反射走時をも入力データとするトモグラフィ解析に着目し、適用性の検討を行っている。予備検討として行った数値実験から、本手法はかなりロバストで適用性の高い手法であるとの印象を得ると同時に、比較的大きな作業量、解釈力を要することが分かった。また、実データへの適用に際して見えてきた解決すべき課題を報告する。

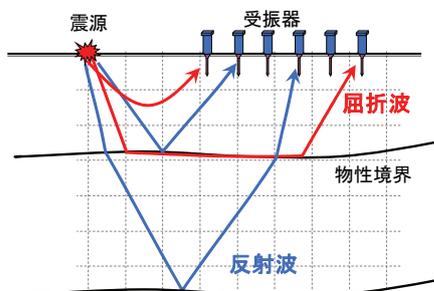


図 1.1 解析対象の屈折波などの初動走時と反射走時

2. アプローチの概要

トモグラフィ解析における速度構造の表現方法として、層構造(例えば, Zelt, 1992)とセル構造等(例えば,

Bishop 他, 1985)に大きく分類される。近年の空間的に高密度なデータの取得, 高分解能な速度分布の表現が可能なることを考慮し, 筆者らは後者を採用した。

反射走時を用いたトモグラフィ解析の研究は 1980年代の中頃から盛んに行われているが(例えば, Bishop 他, 1985), 反射面と速度分布の取り扱い, 反射走時の特定を含む走時残差の算出が大きな課題と考えられる。

これらに対する解決策のひとつとして, 重合前深度マイグレーション用の速度モデル構築を目的とするマイグレーション速度解析(MVA)の利用が挙げられる。この手法はCIP(Common Image Point)などと呼称されるギャザーについて, 深度とオフセットを軸とする平面上で反射イベントを等深度に分布するよう速度を修正するもので, 大きな反射処理ソフトには既に組み込まれている。

筆者らが想定している屈折及び反射走時トモグラフィ解析の標準フローを図 2.1 に示す。初動走時については従来どおりの読み取りを, 反射走時については上記のMVA手法を利用し, 初動走時と反射走時を併せて解析することで, 初動走時のみの解析に比較して大きな探査深度を有し, また, 反射CMP重合法解析の重合速度分布から算出される速度構造などに比較して一段高い精度及び分解能の速度構造を得ることを目指す。なお, MVA手法の重合前深度マイグレーションにはSU(Stockwell, 2017)を, 反射イベントのマッピング深度エラーから反射走時残差の算出はStork(1992)の方法を, 初動走時と反射波走時の残差に基づく速度モデ

ルの修正には重み付き SIRT 法を使用した。

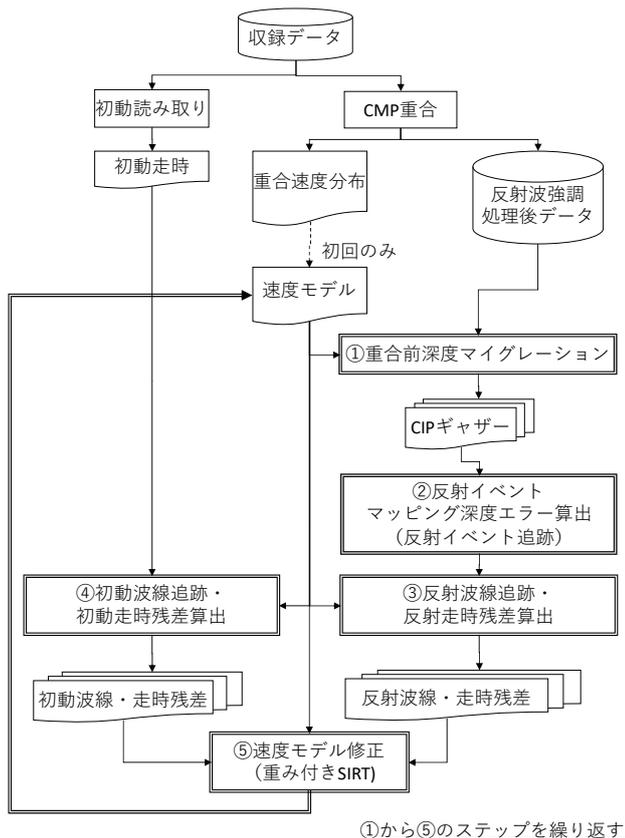


図 2.1 屈折及び反射走時トモグラフィ解析フロー

3. 数値実験による適用性予備検討

屈折及び反射走時トモグラフィの適用性予備検討として数値実験を行った。構築した速度モデルを図 3.1(a) に、数値実験の主なパラメータを表 3.1 に示す。

速度モデルの大きさは水平 7,000m×深度 3,000m とし、発震及び受振点を上端中央の 5,000m 範囲に 5m 間隔で設定した。速度層は 1,000m/s から 500m/s ステップで増加する、一様な傾斜 5 度の 5 層構造とした。波形合成には卓越周波数 30Hz の Ricker ウェーブレットを使用し、オフセット-1,000m から 2,000m までの波形を合成した。

入力データとしては、オフセット-1,000~1,000m までの理論初動走時と、合成波形そのものを用いた。また、初期速度モデルとして図 3.1(c)に示す、反射 CMP 重合法による重合速度を区間速度に変換し、平滑化したものを用いた。

数値実験の結果図として、図 3.1(b)に初動走時のみを用いて再構成した速度トモグラム、図 3.1(c)に CMP 重合法解析による重合速度分布から作成した初期速度モデルとマイグレーション結果、図 3.1(e)に初動走時と反射走時を用いて再構成した速度トモグラムとマイグレーション結果を示す。また、図 3.1(f)には初期速度モデ

ルと速度トモグラムを用いて重合マイグレーション処理により得られた水平距離 2,000m から 5,000m までの 1,000m 間隔の CIP ギャザーを示す。さらに、図 3.2 には、再構成したトモグラムと再構成で目標とするモデルとの速度差について、再構成の繰り返し回数に伴う変化を示す。

また、図 3.3 には再構成したトモグラムに対するチェッカーボード分解能解析の例を示す。同図は 2,000m/s に対して±10%、サイズ 500m の擾乱を与え、2,000m/s 均一の初期速度モデルを使用した解析例である。

表 3.1 数値実験の主なパラメータ

項目	設定値ほか	備考
地表形状	平坦	
速度モデル	5層, 1,000~3,000m/s, 500m/s ステップ	層傾斜 5度 断層傾斜 60度
発震点数	1,001点	距離 1km~6km
発震点間隔	5m	
受振点数	1,001点	距離 1km~6km
受振点間隔	5m	
初動走時データ	オフセット-1,000~1,000mの初動走時	ノイズフリー
CIP 間隔	5m	
セル数	(x)701×(z)1,501	
セルサイズ	(x)10×(z)2m	
反射波形合成	キルヒホッフ型	SU(susynvxzcs), 30HzRicker, ノイズフリー
合成波形オフセット範囲	-1,000m~2,000m	
重合前深度マイグレーション	キルヒホッフ型	SU(wkbj+sumigt opo2d)
初期速度モデル	重合速度分布から区間速度に変換、平滑化したもの	CMP 重合法解析による重合速度分布
反射波線制約	入射角 30度以内	
速度再構成法	SIRT 法	重み付き
SIRT の重み	初動走時: 反射走時 = 1 : 1/10,000~1/2,500	反射走時の重みは入射角に依存
繰り返し回数	4回	

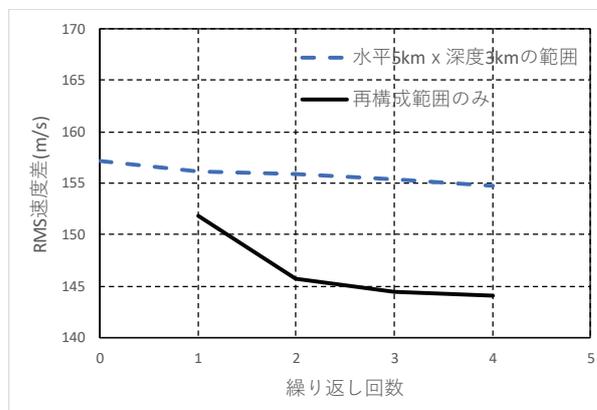


図 3.2 再構成した速度トモグラムと速度モデルの速度差 (RMS 値) の繰り返し回数に伴う変化

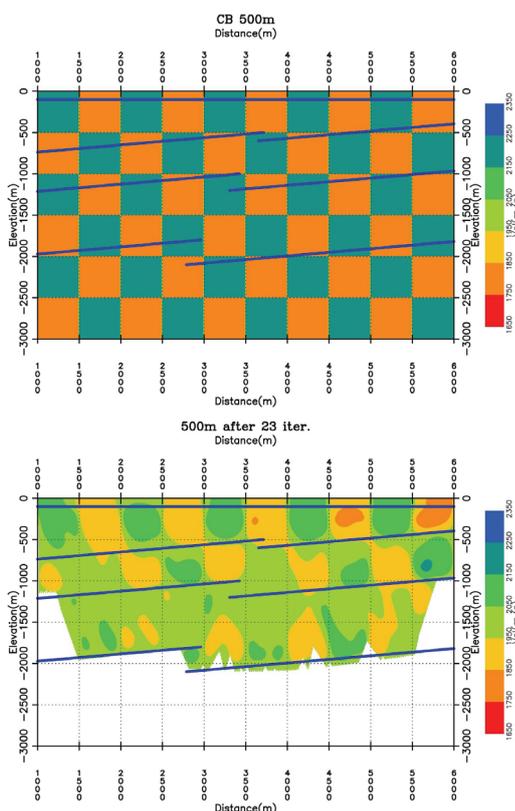


図 3.3 再構成した速度トモグラムに対するチェッカーボード分解能解析例（擾乱速度 10%、サイズ 500m）

今回の数値実験から得られた主な結果及び知見を以下に示す。

- 数値実験で用いたモデルは、解析対象横方向全域に反射面が分布することから、初動走時のみの場合に比べ、反射走時を利用することで再構成可能深度が最下位の反射面まで広がった。

- モデルとトモグラムの速度差、トモグラムの速度分布の滑らかさ、CIP ギャザーのマッピング反射イベントの平坦さなどから判断すると、初動走時と反射走時を利用したトモグラフィ解析による速度分布の改善は僅かである。トモグラムについて改善された領域として認められるのは、浅部（第一速度層）や測線端部に留まる。なお、前者は屈折走時の効果が大きく寄与したものと推測される。

- 顕著な改善が認められなかった主たる原因は、構築した速度モデルの反射面の傾斜が 5 度と小さく、CMP 重合法の重合速度を参考に構築した初期速度モデルが再構成の目標である速度モデルに近かったことが大きいものと考えられる。実際、本報では結果の掲載を割愛するが、再構成の初期の段階で、大きなウインドウ幅の平滑化処理を施し、目標とする速度モデルに対して大きな速度差を有する速度モデルを再構成した場合にも、ウインドウ幅を漸減させるその後の繰り返しに

より最終的には今回と類似した速度トモグラムを得た。このことは、本手法がロバストな手法であることを示す一面と考えられる。

- チェッカーボード分解能解析からは、今回の解析条件下では反射面の間隔程度の深度分解能が期待できるように見えるが、更なる検討が必要である。

4. まとめと今後の課題

探査深度の拡大を主目的に、屈折及び反射走時トモグラフィ手法に着目し、適用性予備検討として数値実験を行った。数値実験からは、反射面が解析対象領域の広い範囲に分布する場合、本手法により探査深度を拡大できることを確認した。また、波線数の増大が主に寄与しているものと推測されるが、かなりロバストな手法であるとの印象を得ると同時に、予想どおり比較的大きな作業量及び解析時間を要することも分かった。また、実データへの適用に際して以下の課題を認識した。

- 調査測線の屈曲、いわゆる **crooked line** への対応。
 - 静補正適用の適否。再構成可能な速度分布スケールの観点からの検討が必要。
 - CIP ギャザー上の反射走時の特定。共通発震点や共通受振点ギャザーに比べ、CIP ギャザーでは反射波が同一深度付近にマップされることから特定しやすいとはいえ、実データでは様々な波群が重なり、特定は容易でなく、解釈のウエイトが高まるものと想定される。
- 今後はこれらの課題の解決に向け検討を進めると共に、探査深度の拡大だけでなく、初動走時トモグラフィが不得意とする低速度異常域の検出など、波線密度の高さの長所を利用した適用分野の拡大についても検討を進めていきたい。

参考文献

Bishop, T. N., Bube, K. P., Cutler, R. T., Langan, R. T., Love, P. L., Resnick, J. R., Shuey, R. T., Spindler, D. A., and Wyld, H. W. (1985) : Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media, *Geophysics*, **50**, 903-923.

Stockwell, J (2017) : SeisUnix, <https://github.com/JohnWStockwellJr/SeisUnix>

Stork, C. (1992) : Reflection tomography in the postmigrated domain, *Geophysics*, **57**, 680-692.

Zelt, C. A., and Smith, R. B. (1992) : Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure, *Geophys. J. Int*, **108**, 16-34.

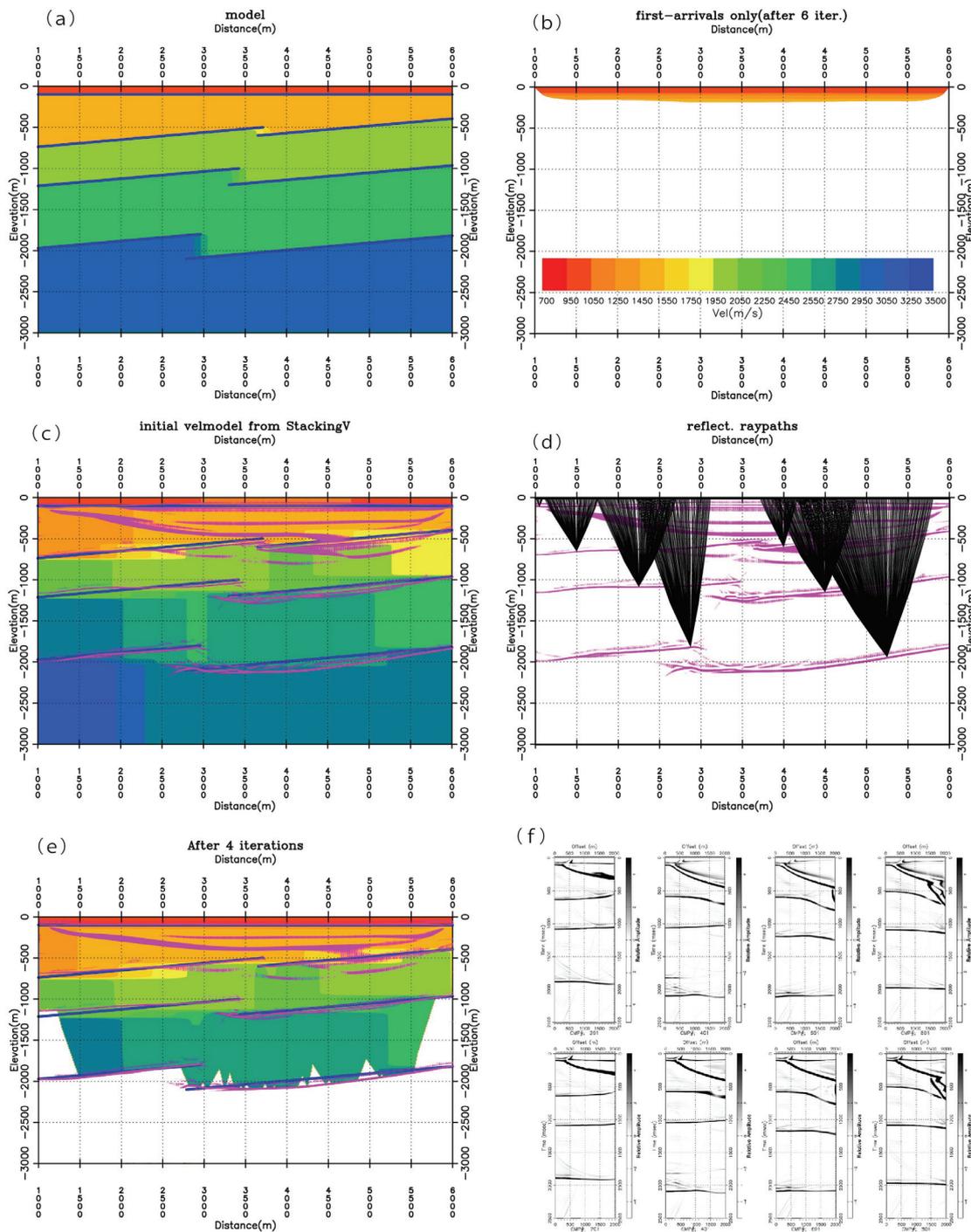


図 3.1 数値実験結果図

(a)構築した速度モデル及び反射面(青線). (b)初動走時のみ用いて再構成した速度トモグラム. (c)反射 CMP 重合法の重合速度分布から構築した初期速度モデルと同速度モデルを使用した重合前深度マイグレーション結果 (ピンク色塗). (d)(c)の速度モデル及びマイグレーション結果を用いて算出した反射波線の例. (e)屈折及び反射走時を用いて再構成した速度トモグラムと同速度トモグラムを使用したマイグレーション結果. (f)水平距離 2000m,3000m,4000m 及び 5000m の CIP ギャザー (上段; 初期速度モデル(c), 下段; 再構成速度トモグラム(e)を使用)