

(55) サイスマックトモグラフィーにおける 入力データの調整および選定法

応用地質株式会社 齋藤 秀樹

Examination and Adjustment of Traveltime Data for Seismic Tomography

Hideki SAITO, OYO Corporation

Abstract

To get a high quality tomogram in seismic tomography, it is necessary to examine traveltime data carefully before inputting them to a reconstruction program. However, it has not been well known how to examine those data.

In this study, the author tried to find some characteristics of first arrival traveltime curves obtained by crosshole seismic measurements. As the results of numerical experiments, it is found that the traveltime reciprocity and the parallelism among traveltime curves are valid for crosshole measurements as well as surface refraction surveys.

Based on the results, the author proposes a method for examination and adjustment of traveltime curves for seismic tomography, which must improve the quality of tomography results.

1 まえがき

筆者は、これまで多くのサイトにおいて、サイスマックトモグラフィーを用いた調査・実験を実施してきた。その経験によれば、サイスマックトモグラフィーを成功に導く鍵は、適切な探査計画の立案と入力データの吟味であると言っても過言ではない。前者については、例えば今吉他(1991)が、探査対象地盤の大局的な速度構造をあらかじめ想定し、数値実験によって、適切なボーリング孔間隔や起振点・受振点の配置間隔などを決定すべきであると指摘している。一方、後者については、入力データ(すなわち初動走時)を入念にチェックすべきであるということはいわゆるよくいわれるが、具体的に、何を基準にしてチェックを行えばよいかということあまり検討されていない。そこで、ここでは、データの吟味法について考えてみたい。

走時曲線のチェックという意味では、トモグラフィーと同様に初動走時を扱う屈折法地震探査における走時曲線の調整法が参考になるものと思われる。そこで、本稿では、まず屈折法走時曲線との類似性にもとづき、サイスマックトモグラフィーの代表的なジオメトリのひとつであるクロスホール測定で得られる初動走時曲線の性質を調べることにする。そして、トモグラフィーの入力データとして、走時曲線がもつべき条件をまとめ、その条件を満足するように走時曲線を調整あるいは選定する方法について考察する。

2 屈折法地震探査の走時曲線の性質

屈折法地震探査においては、周知のように、走時曲線の調整を行い、理論にあった走時曲線を完成させることが、正しい解析の基本である。例えば栗原(1959)は、屈折波の波線理論にもとづき、屈折波の走時曲線がもつべきいくつかの条件をあげている。そして、実際の測定走時曲線がそのすべての条件を満足するかどうか点検し、その条件を満たすように走時曲線を調整して初めて、正しい解析が可能であると指摘している。

そこで、まず、屈折法走時曲線の満たすべき条件としてよく知られているいくつかの性質のうち、サイスマックトモグラフィーへの応用が期待できる「往復走時の一致」および「走時曲線の平行性」の2点について、あらためて整理しておく。

2-1 往復走時の一致

起振点から受振点までの間を波が伝播するのに要する時間が「走時」であり、そのうち最も早く到達する波の走時が「初動走時」である。初動となる波の伝播経路は、最短時間経路と呼ばれ、起振点と受振点の位置を逆にしても、その経路は変わらず、初動走時は同一であることが知られている。具体的には、図-1に示すような屈折法の走時曲線において、 $T_{AB}=T_{BA}$, $T_{AC}=T_{CA}$, $T_{AD}=T_{DA}$, $T_{BC}=T_{CB}$, $T_{BD}=T_{DB}$, $T_{CD}=T_{DC}$ となるのが往復走時の一致の条件である。このように、受振区間に対して左右両方向の起振点からの波を観測することを往復測定と呼ぶ。

2-2 走時曲線の平行性

図-2に示すように、起振点から同一方向に伸びる走時曲線に着目したとき、受振区間のうち、同一屈折面からの屈折波が初動となる部分で、走時曲線が平行になる（言い換えれば、走時差が一定になる）ことが、走時曲線の平行性という性質である。この性質を分かりやすくするため、同図中には、2本の走時曲線の差（以下、走時“差”曲線と呼ぶ）を併せて示した。同図より、走時差曲線は、起振点からの距離が大きくなるにつれて、単調減少することがわかる。つまり、同一方向へ伸びる2本の走時曲線の間隔は、起振点からの距離が大きくなるにつれて狭くなっていくもので、この特徴も含めて、走時曲線の平行性と呼ぶことにしておく。

3 クロスホール走時曲線の性質

前項では、地表にのみ起振点・受振点を配置する屈折法探査の走時曲線の特徴をまとめた。サイスミックトモグラフィにおいては、地表のほかにボーリング孔や試掘横坑内にも起振点・受振点が配置される。ここでは、代表的なジオメトリのひとつであるボーリング孔間（いわゆるクロスホール）測定に着目し、クロスホール測定で得られる初動走時曲線の性質を、屈折法走時曲線との類似性にもとづいて調べることにする。

3-1 往復走時の一致

往復走時の一致という性質は、起振点・受振点の設置場所によらず成り立つものなので、クロスホールの走時曲線でも、この条件は満足されなければな

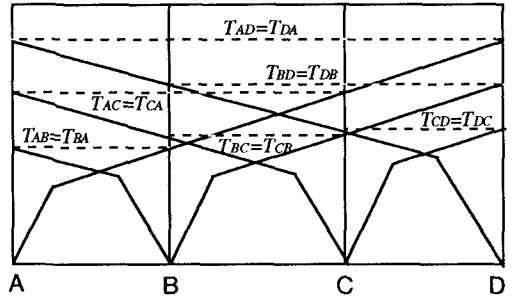


図-1 屈折法探査における往復走時の一致

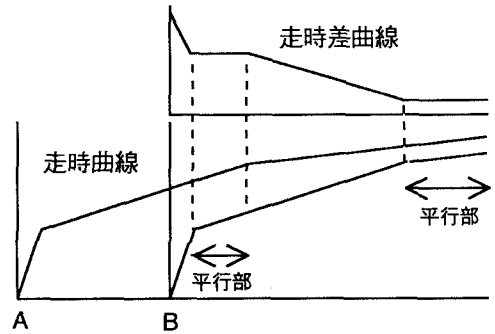


図-2 屈折法探査における走時曲線の平行性

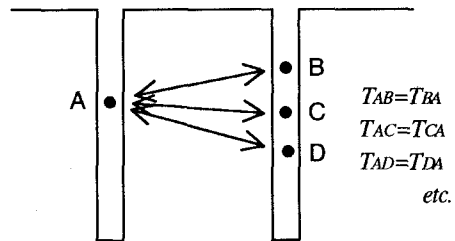


図-3 クロスホール測定における往復走時の一致

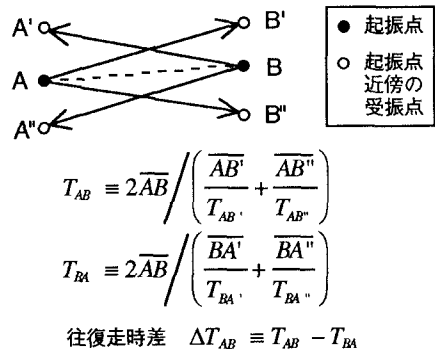


図-4 クロスホール測定における往復走時差の定義

らない。具体的には、図-3に示すように、相対するボーリング孔に配置された2点間の初動走時は、どちらが起振点となった場合でも同一の値にならなければならない。実際には、往復測定の際の起振点と受振点の位置が一致するとは限らないので、ここでは、往復走時“差”を図-4のように定義することにする。このように定義した場合、起振点や受振点の近傍に速度境界が存在すると、往復走時が完全には一致しないことが予想される。そこで、速度コントラストの大きい境界が存在する数値モデルを想定し、往復走時にどの程度の差が発生するかシミュレーションしてみた。図-5(a)に、想定したモデルと起振点・受振点配置を示す。対象領域は、孔間距離30m、深度範囲50mとし、1.0~5.0km/s の速度をもつ水平成層構造とした。起振点は4m間隔、受振点は2m間隔に配置した。初動走時は、ホイヘンスの原理にもとづくレイトレーシング (Saito, 1989) によって計算した。図-5(b)に、起振点番号1~12に対応する走時曲線を示した。起振点番号13~24に対応する走時曲線も、これと同一になる。表-1に、すべての起振点間の往復走時の差を示す。速度コントラストの大きい境界を有するモデルを想定したが、全データの約80%は、往復走時差が0.1msec以下であり、また往復走時差0.2msec以下の範囲には全データの95%が含まれる。往復走時差の平均値は 0.00msec、分散は 0.096msec と、非常に小さい値を示した。ここで想定したような規模のトモグラフィー測定を実際に行った場合、通常、初動走時の読み取り精度は 0.1msec 程度と考えられるので、速度コントラストがかなり大きい場合でも、往復走時は、読み取り誤差の範囲程度で一致すべきものと考えて良さそうである。

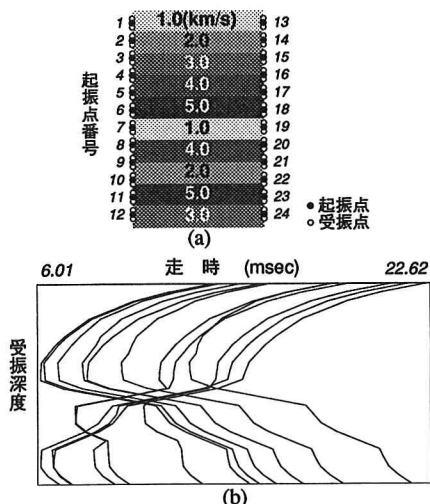


図-5 往復走時差に関する数値シミュレーション結果 (a) モデルとジオメトリ、(b) 走時曲線

表-1 起振点間の往復走時差一覧表

起振点 番号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	.00	.01	-.02	.13	.02	.02	-.01	.02	.17	.00	.01	.02
2	-.01	.00	.00	.12	.01	.02	-.02	.01	.16	-.01	.00	.01
3	.02	.00	.00	.12	.00	.01	-.03	.00	.16	-.01	.01	.01
4	-.13	-.12	-.12	.00	-.06	-.05	-.09	-.06	.10	-.07	-.05	-.05
5	-.02	-.01	.00	.06	.00	.01	-.02	.00	.16	-.01	.00	.00
6	-.02	-.02	-.01	.05	-.01	.00	-.02	.00	.16	-.01	.00	-.01
7	.01	.02	.03	.09	.02	.02	.00	-.01	.20	-.35	.02	.01
8	-.02	-.01	.00	.06	.00	.00	.01	.00	.21	-.41	.01	-.01
9	-.17	-.16	-.16	-.10	-.16	-.16	-.20	-.21	.00	-.09	.16	.14
10	.00	.01	.01	.07	.01	.01	.35	.41	.09	.00	.04	.03
11	-.01	.00	-.01	.05	.00	.00	-.02	-.01	-.16	-.04	.00	-.01
12	-.02	-.01	-.01	.05	.00	.01	-.01	.01	-.14	-.03	.01	.00

往復走時差 (msec)

3-2 走時曲線の平行性

クロスホール測定の場合にも走時曲線の平行性が成り立つかどうか、数値シミュレーションによって検討する。まず、クロスホール測定による走時差曲線を、図-6に示すように定義する。ある受振深度区間において、2つの起振点からの走時の差をとる際、浅部の起振点の走時から深部の起振点の走時を引くこととしておく。こうして定義された走時差曲線が、図中で右下がりに、すなわち深度とともに単調増加するかどうかを、数値シミュレーションで調べることにする。

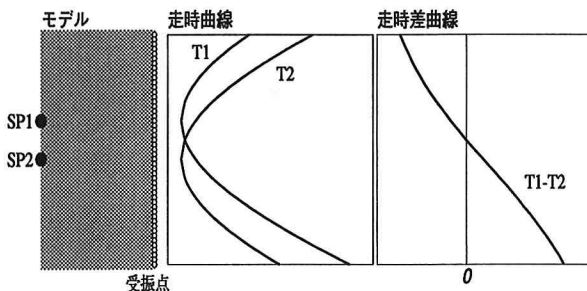


図-6 クロスホール測定における走時曲線および走時差曲線

実際には、多くの速度モデルを想定して計算を実施したが、そのうちの2例の計算結果を図-7および8に示す。対象領域の大きさは、30x50mとし、起振点間隔4m、受振点間隔1mとした。ホイヘンスの原理にもとづくレイトレーシングにより計算した初動走時曲線と、すべての走時曲線間の走時差曲線をそれぞれ図中に示した。なお、走時曲線および走時差曲線は、それぞれの最大値・最小値で規格化して図示した。速度コントラストの大きい複雑な構造を想定したにもかかわらず、すべての走時差曲線は、深度とともに単調増加を示すことがわかった。この「走時差曲線が深度とともに単調増加する」という傾向は、本研究で想定した他の多様な速度構造モデルについても成り立つものであった。

ただし、さらに多くのモデルについてシミュレーションした結果、上記の結論には次のような例外があることがわかった。すなわち、図-9に示すように、対象とする断面の背後に高速度層が存在するモデルでは、受振距離が長くなると、高速度層からの屈折波が初動となるため、走時差曲線に左下がり（すなわち減少傾向）の部分（図中A-B間）が現れる。

以上の数値実験の結果をまとめると、クロスホール測定 of 走時差曲線については、「起振点と受振点に囲まれた範囲に2次元構造を想定する限り、走時差曲線は深度とともに単調増加する」ということができる。

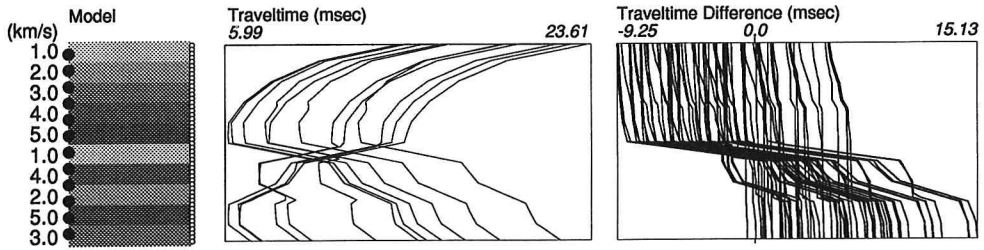


図-7 水平多層構造モデルに対する走時曲線および走時差曲線シミュレーション結果

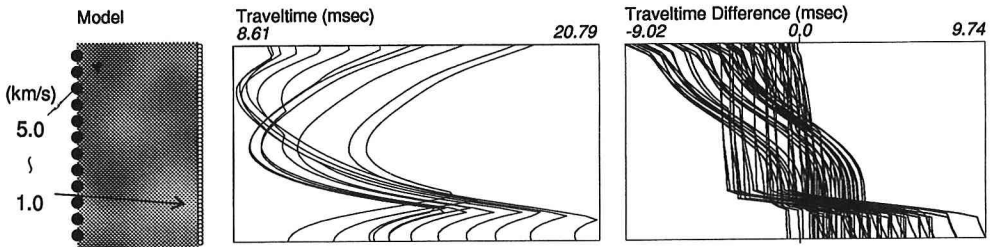


図-8 ランダムな速度分布モデルに対する走時曲線および走時差曲線シミュレーション結果

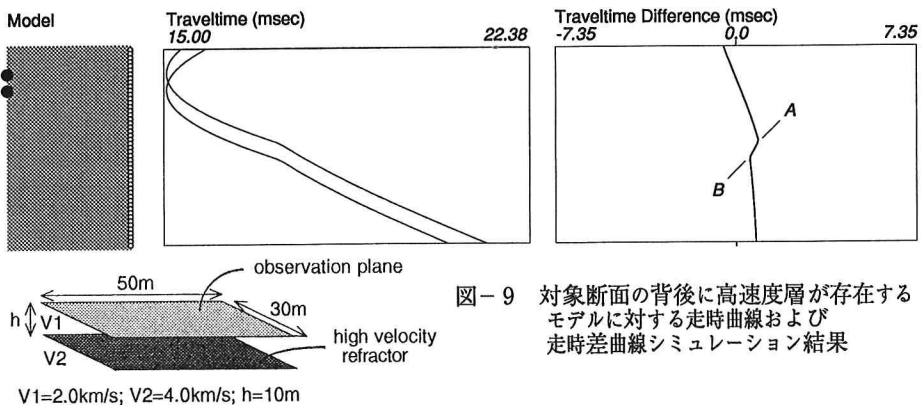


図-9 対象断面の背後に高速度層が存在するモデルに対する走時曲線および走時差曲線シミュレーション結果

4 走時曲線の調整および選定法

以上、クロスホール測定で得られる初動走時曲線の性質について調べてきた。その結果、クロスホール測定の走時曲線も、屈折法探査の場合と同様に、往復走時の一致および走時曲線の平行性という性質をもつことがわかった。ここでは、それらの性質を利用して、走時曲線の調整や選定を行い、トモグラフィーの入力データとして完成させる方法について提案する。

上記の2つの性質のうち、往復走時については、個々の走時データの読み取り誤差や読み誤りなどを十分に除去したうえで考えるべきなので、まず平行性に着目したチェックを行う。具体的には、走時差曲線を描き、それが深度とともに単調増加することを確認すればよい。そうならない場合は、個々の走時を再度読み直すなどして、平行性が成り立つよう、走時曲線を調整すべきである。また、どうしても平行性が成り立たない場合、対象断面外の高速度部の影響など、2次元トモグラフィーの理論にあわない状況を反映していると考えられるので、走時曲線のその部分の走時データは、入力データから除去する（使用しない）こととするのが良策と考える。

次に、すべての起振点の組み合わせについて、往復走時のズレを調べる。走時曲線の平行性が確認されたとすれば（すなわち個々の走時の読み取り誤差は十分小さいとみなされるならば）、往復走時が一致しないことの一番大きな原因は、ショットマークの読み取り誤差や読み誤りであることが多い。したがって、まずショットマークの読み直しをするのがよい。それでもまだ、往復走時が一致しない場合、往復走時差を小さくするように、最小二乗法によって、各起振点に時間シフト量を与え、個々の起振点に起因する誤差を除去することにする。つまり、ある起振点での起振によって得られたすべての走時に、一定の時間シフト量を加算することになり、これは、屈折法探査において、走時曲線を時間軸方向に平行移動して往復走時を一致させる処理と全く同一のものである。

以上のような調整および選定をした走時は、トモグラフィーの理論上、入力データとしての必要条件を満たしていると考えられるので、解析に用いることができる。

5 あとがき

サイズミックトモグラフィーの解析は、入力された走時をもっとも良く説明し得る速度構造モデルを求めるものである。その反面、走時データに含まれる誤差を吟味せずに入力しても、何らかの速度値は算出されてしまう。しかし、正しいデータを入力しなければ、正しい解析が行えないことは言うまでもない。解析後に、トモグラム上で、入力データに起因する誤差を議論することは不可能であり、このことから、入力データの十分なチェックと調整・選定などの作業が重要であることがわかる。本稿では、走時曲線のもつべき性質をもとに、入力データの調整および選定法を具体的に述べた。そうしたデータチェックを実現するためには、例えば、クロスホール測定においても、屈折法同様、往復測定をすべきであるといえる。このように、適切な探査計画を立案し、入力データを十分に吟味することが、トモグラフィー解析の品質向上につながるものと考えられる。今後、この種のデータチェック法について研究を続け、さらに、現場での測定データQCの方法や効率的なジオメトリ計画法などについても検討を重ね、トモグラフィー解析の品質向上に努めたい。

参考文献

- 今吉 隆、斎藤秀樹、高橋 亨 (1991)、速度コントラストの大きい地盤へのサイズミックトモグラフィーの適用、応用地質年報、No. 13、73-86。
- 栗原重利 (1959)、屈折走時曲線の選定法並びに零走時による屈折走時曲線の解析法、九州鉱山学会誌、Vol. 28、144-168。
- Saito, H. (1989)、Travel times and ray paths of first arrival seismic waves: Computation method based on Huygens' principle, 59th Annual International Meeting, Soc. Expl. Geophysicists, Expanded Abstracts, 244-247。