

4. 弾性波探査（解析等調査業務）

別途業務により実施された弾性波探査（発破法）の現地観測データ（弾性波探査結果）、解析の妥当性の検証を行った。検証にははざとり法（荻原の方法）による解析と、観測された走時データに最も近い最適の速度層分布を、コンピューターを用いた繰り返し計算によって求める「トモグラフィ的解析」の比較検証により実施した。以下にはざとり法とトモグラフィ的解析の両手法を述べる。

4.1 概要

弾性波探査の具体的な目的は、①未固結堆積物層や風化帯の厚さ、分布状況の推定 ②異種岩盤の境界、断層破碎帯の位置や規模の推定 ③岩盤強度を推定し岩盤分類を行うための基礎資料とする、等々が挙げられる。

一般的に弾性波探査技術には、屈折法と反射法の二つがあるが、本業務では土木地質調査で一般的である屈折法を用いた。屈折法弾性波探査は、地表または地下浅所で人工的に弾性波を発生させ、地層境界で屈折して地中を伝播する速度を地表面に等間隔に設置した受振計で記録し、その伝播走時を解析し、地下の速度構造を求めるものである（図 4.1.1 参照）。

地盤を伝わる弾性波の伝播速度は、その地盤の硬軟や密度に支配される。したがって、地盤の弾性波速度を知ることにより、地盤の硬軟や密度などの工学的性質を把握することができる。また、屈折法による弾性波探査では、地中深部に上部よりも速い層があるとき、震源から一定間隔離れた地点では、上部層を伝わってくる波よりも、一度下部の速い層を伝播した波が初動として観測される。この距離（臨界距離）は上層の厚さと、上層と下層の弾性波速度比により決まる（スネルの法則）。地盤は一般に深くなるに従い弾性波速度が速くなるので、この原理を応用させることにより、何層かの弾性波速度の異なる地層から構成される地盤で、各層の厚さとその弾性波速度を求めることができる。

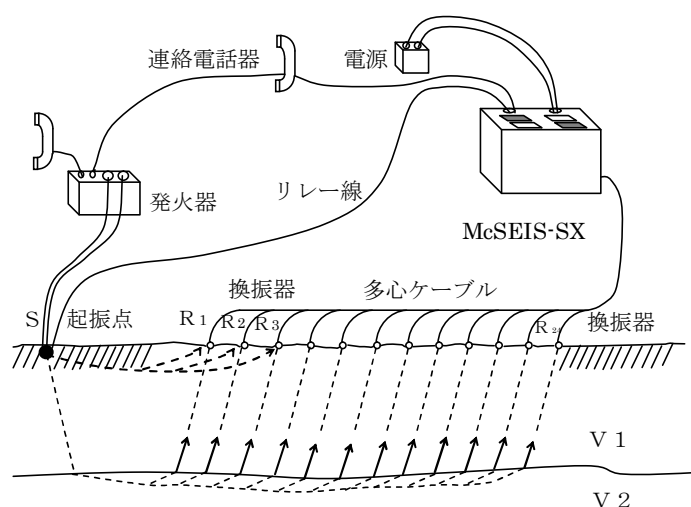


図 4.1.1 弾性波探査概念図

4.2 測線配置

弾性波探査は、H30 県債国補国改 第 1 号-16 国道 168 号道路改築調査業務において、中心線付近を通るトンネル縦断方向の弾性波速度を測定する主測線と、横断方向の弾性波速度を測定する副測線で実施されている。

本業務では、既往のデータからはぎとり法の再解析とトモグラフィー的解析を実施した。その解析数量を表 4.2.1 に、測線位置図を図 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 弾性波探査解析数量

測線名	実施数量(km)	備 考
主測線 1	0.330	測点間隔 5m
主測線 2	0.775	測点間隔 5m
主測線 3	0.460	測点間隔 5m
副測線 1	0.100	測点間隔 5m
副測線 2	0.100	測点間隔 5m
計	1.765	

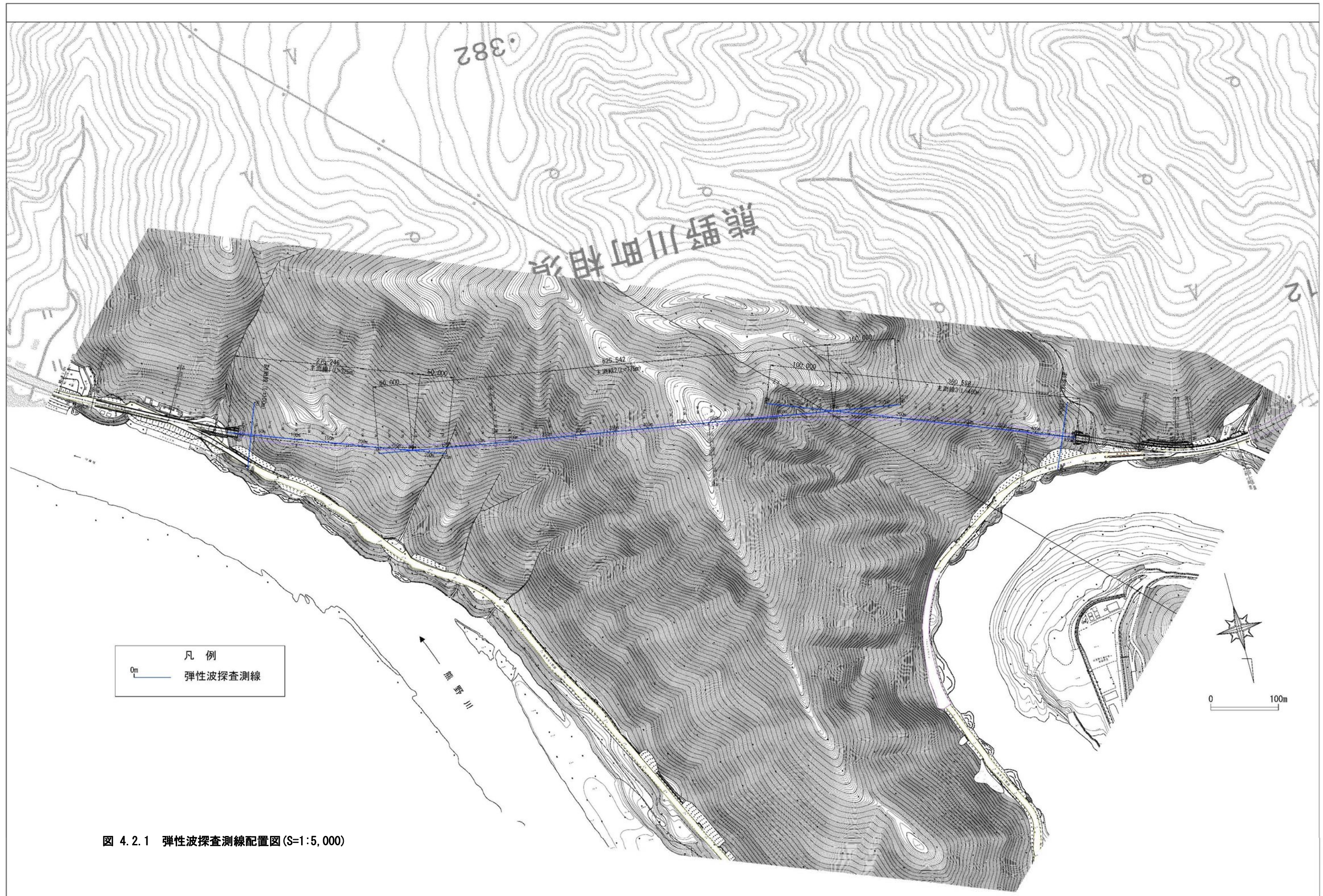


図 4.2.1 弾性波探査測線配置図 (S=1:5,000)

4.3 はぎとり法解析（弾性波屈折法）

4.3.1 本解析の方針と走時曲線の作成

振源と測定地点間を波が伝播するのに要した時間を走時とよび、それをグラフ化したものが走時曲線である。測線毎に示した走時曲線図は、測定より得られた記録から初動走時（発破時から換振器に最初に波が到達するのに要した時間）を読み取り、距離を横軸に、時間を縦軸に取り、起振点と換振器間の距離の関係をプロットしたものである。

記録には 1/100 秒毎に刻時線が刻まれ（4mm 間隔）、これを目測によって 1/1000 秒まで読み取る。走時曲線図は距離を 1/500 の縮尺で（測点間隔 1cm）、時間を 2cm、1/100 秒の割合で目盛りする。波の伝播速度＝距離／時間であるから、走時曲線の傾きの逆数が波の伝播速度を表わすことになる。

走時曲線にはいくつかの性質（作成する上での条件）がある。

プロットした当初の走時曲線は、起振点および受振器設置の条件の相違や記録の読み取り誤差などのため必ずしも満足したのもではなく、いくつかの矛盾を含んでいるものもある。走時曲線の作成においては、その条件を満たすように記録の読み直し、あるいは起振点どうしの相関等を考慮して随時修正していく。

今回入手した既往走時曲線図及び測定データ等を確認したところ図 4.3.1 の例に示す様に、1. 測定データの読取りにばらつきがある。2. 各測線の走時曲線の起振点間の往復走時に大きな誤差がある。3. 走時曲線の並行性にバラツキが見られる。4. はぎ取り深度走時と原点深度走時は一致するが、誤差が大きい。5. はぎ取り曲線が時間軸の 0msec よりマイナス側にもぐっている。6. 基盤岩速度値や中間層の速度値の求め方が不明確。7. 低速度帯の求め方が不明確な点が認められたため、以下の点に着目し補正を行った（図 4.3.2）。

- ① 展開の繋ぎ目の一致:測定区間(展開)毎の端の繋ぎ目は一致する。
- ② 往復走時の一致:相対する起振点間での波の所要時間は一致する。
- ③ 原点走時の一致:起振点から両方に伸びるT' 曲線は起振点(原点)付近で急激な変化がない場合は一致する。
- ④ 走時の平行性:同一方向、同一速度層を伝播する走時は平行性を保つ。

完成した走時曲線は地表付近の低速度層の不均一な分布を反映して凹凸が激しいこと、あるいは速度層の傾斜によって、走時曲線そのものの勾配からは速度値を決定することは困難であることが多い。したがって、これら走時曲線の凹凸や見かけの勾配を取り除くため、相対する往復走時曲線から速度走時曲線（T' 曲線）を作成し、この T' 曲線の勾配から速度値を決定することができる。

参考として、弾性波速度と地質との関係を示す。

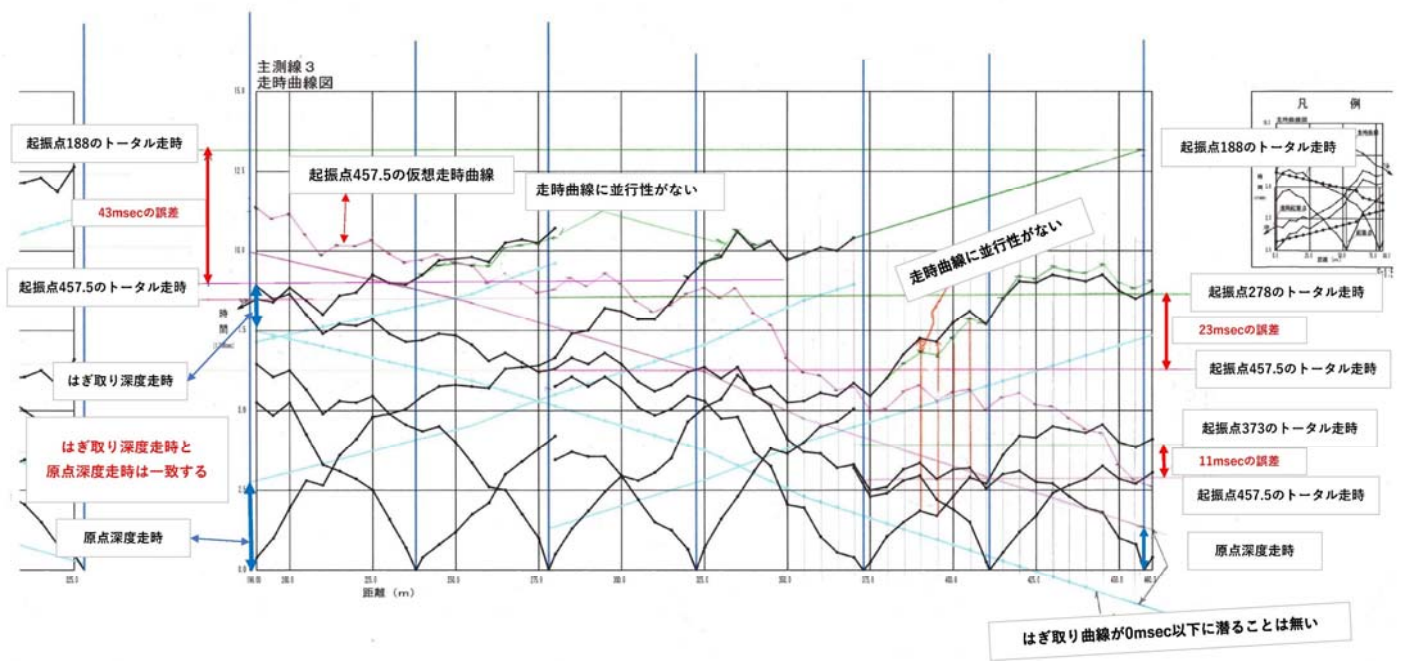
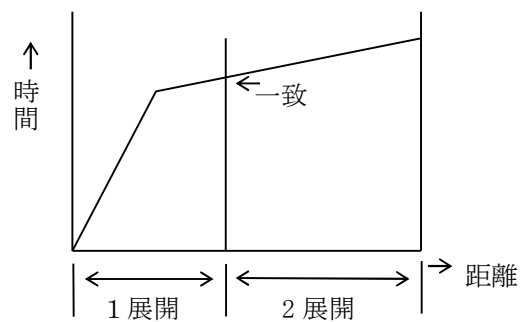
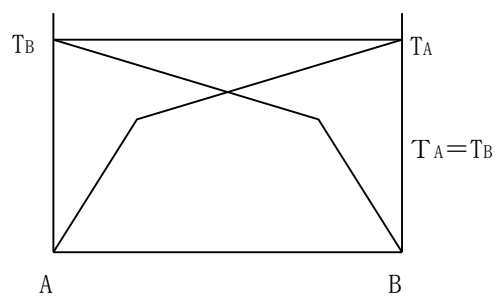


図 4.3.1 走時曲線図の整合性についての確認箇所の例

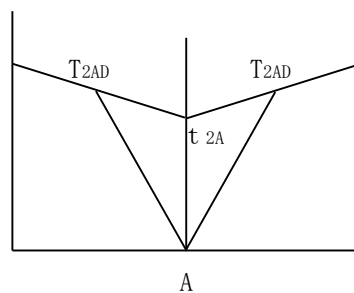
- ① 展開の繋ぎ目の一致
測定区間（展開）毎の
繋ぎ目は一致する。



- ② 往復走時の一致
相対する起振点間での
所要時間は一致する。



- ③ 原点走時の一致
起振点から両方に伸びる
T' 曲線は起振点（原点）
付近で急激な変化のない
場合は原点で一致する。



- ④ 走時の平行性
同一方向、同一速度を
伝播する走時は平行性
を保つ。

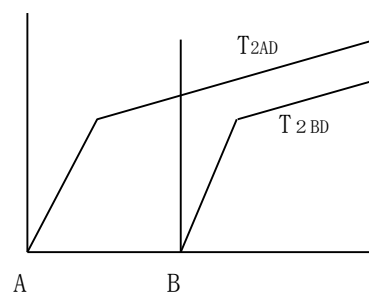


図 4.3.2 走時曲線の性質

パス計算についての簡単な解説

図 4.3.3 で、はざとり線上に検出された低速度帯の見掛けの幅を③～④とすると、パス計算後の幅はそれよりも狭いと考えられる。そこで任意の点①から逆にノモグラムを使用してパス（波動の経路）計算をして地表（解析断面図上）の①～③の直上）に波が出現すれば①の位置が低速度帯の端の点と考えられる。

同様に②の点についてもパス計算を実施し②`（④直上）に出現すればもう一つの端と考えることができる。低速度帯のパス計算は、ノモグラムを利用して作図的に求めることができる。

実際にはもっと複雑な計算になるが便宜上ノモグラムを使用することにより、見掛け幅をより正確な幅で表現することができると考えられる。

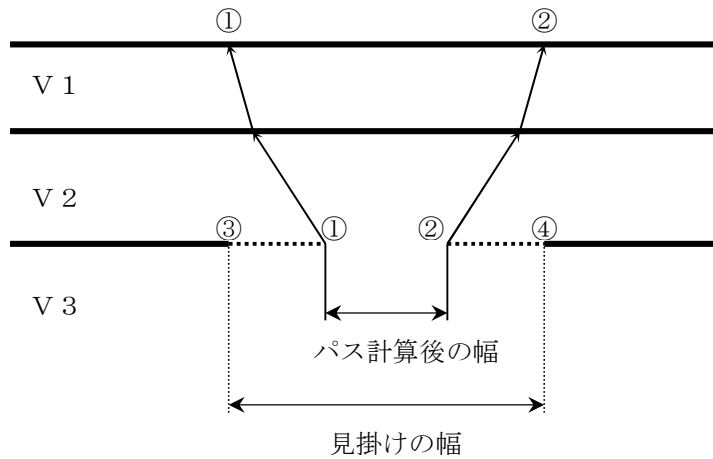
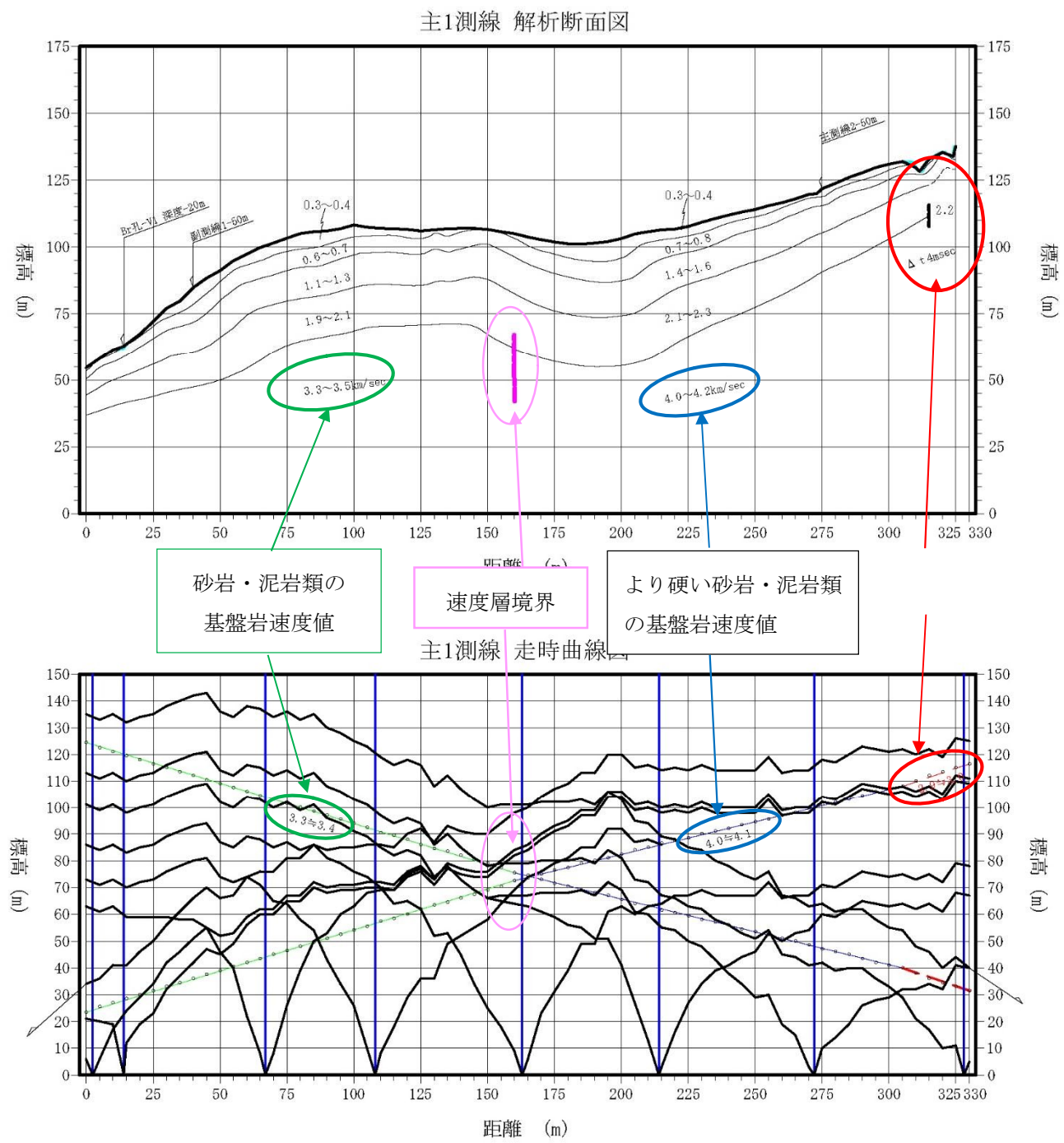


図 4.3.3 パス計算についての概念図

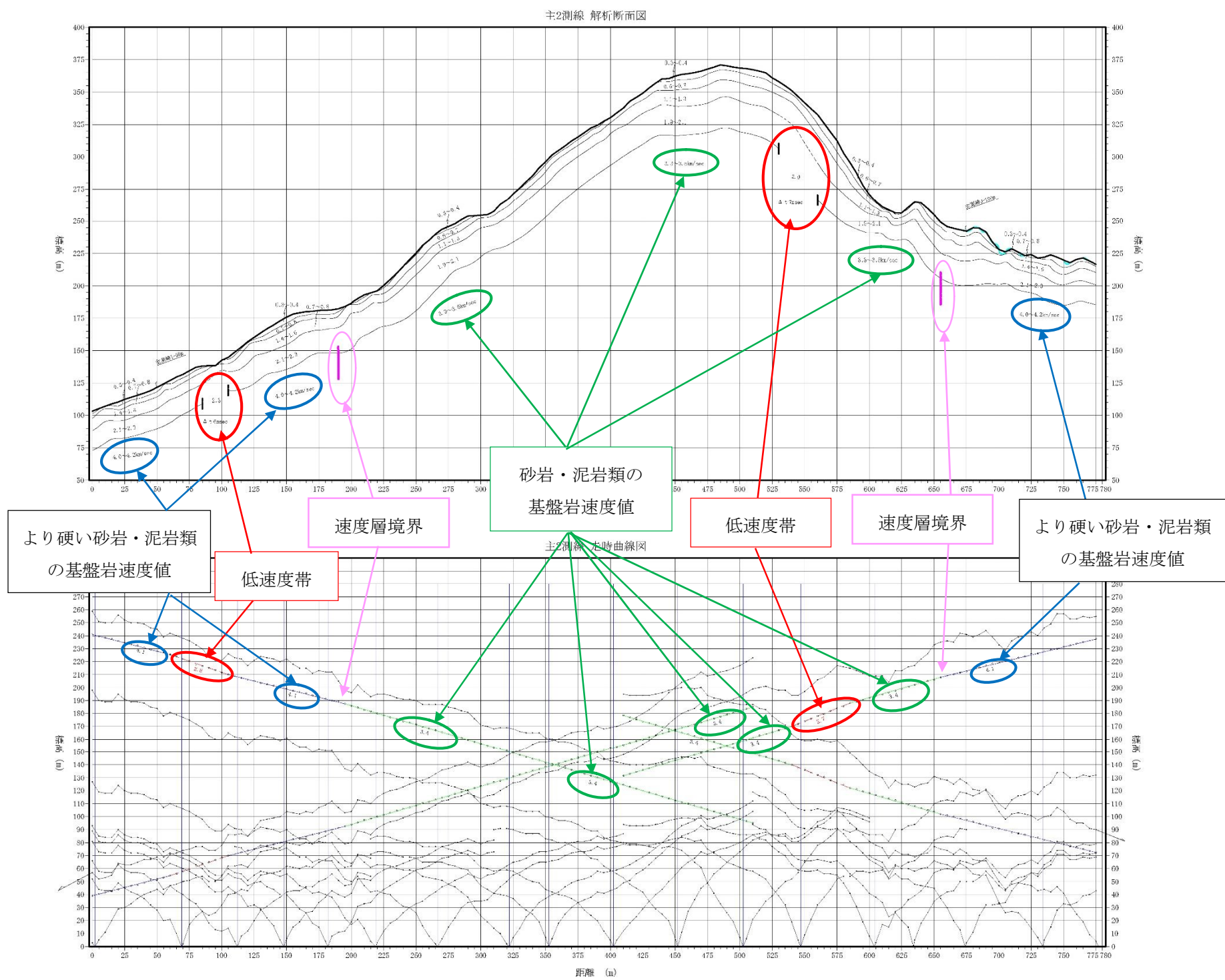
4.3.2 解析結果

解析結果は、図 4.3.6～図 4.3.7 に示す様に、測線毎に走時曲線図と共に解析断面図に示した。
本調査で得られた速度層は大別 5 層構造に分類することができる。



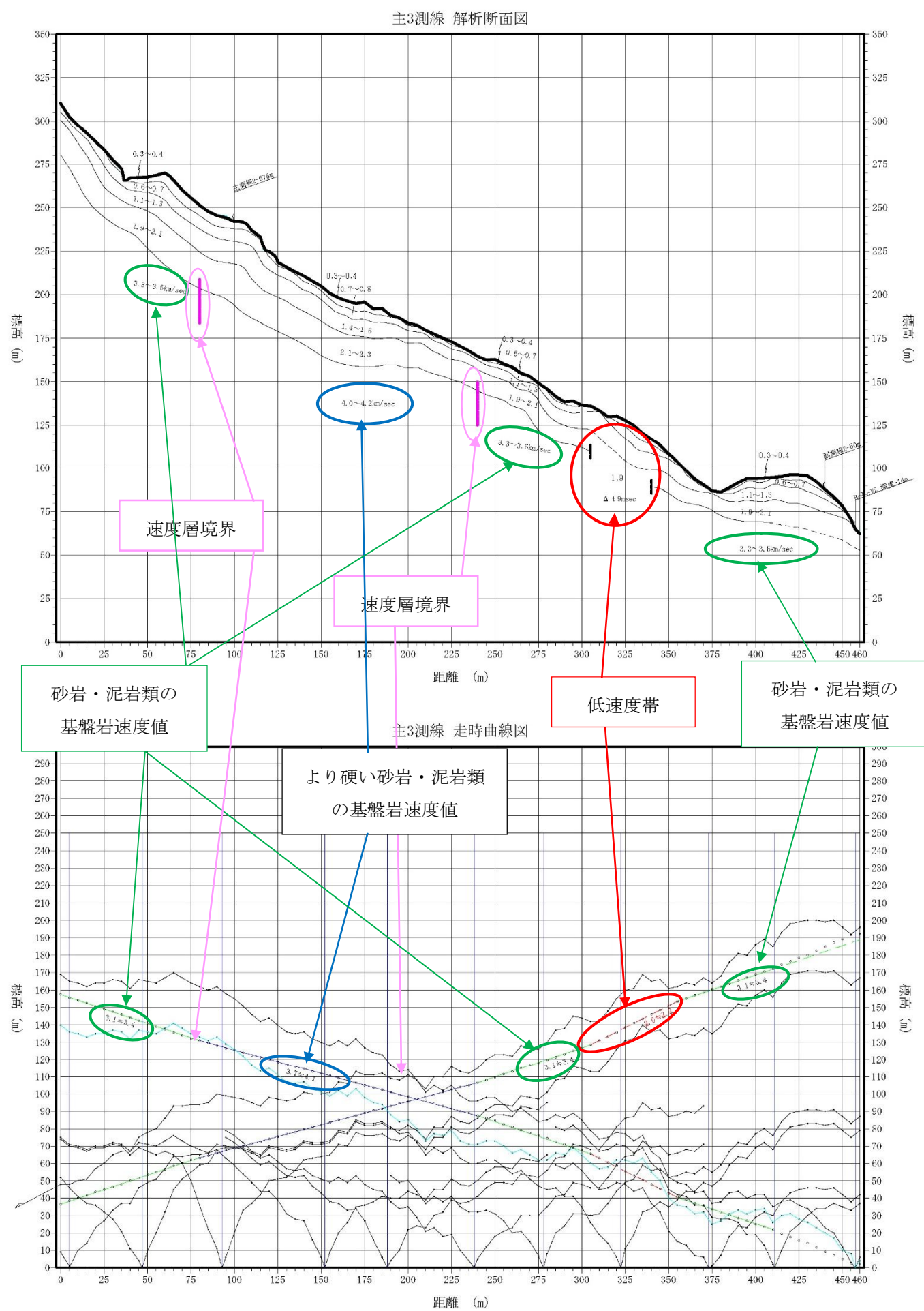
(上段は屈折解析図、下段は走時曲線図)

図 4.3.4 はぎとり法による弾性波探査結果図 主測線1 (S=1:2, 500)



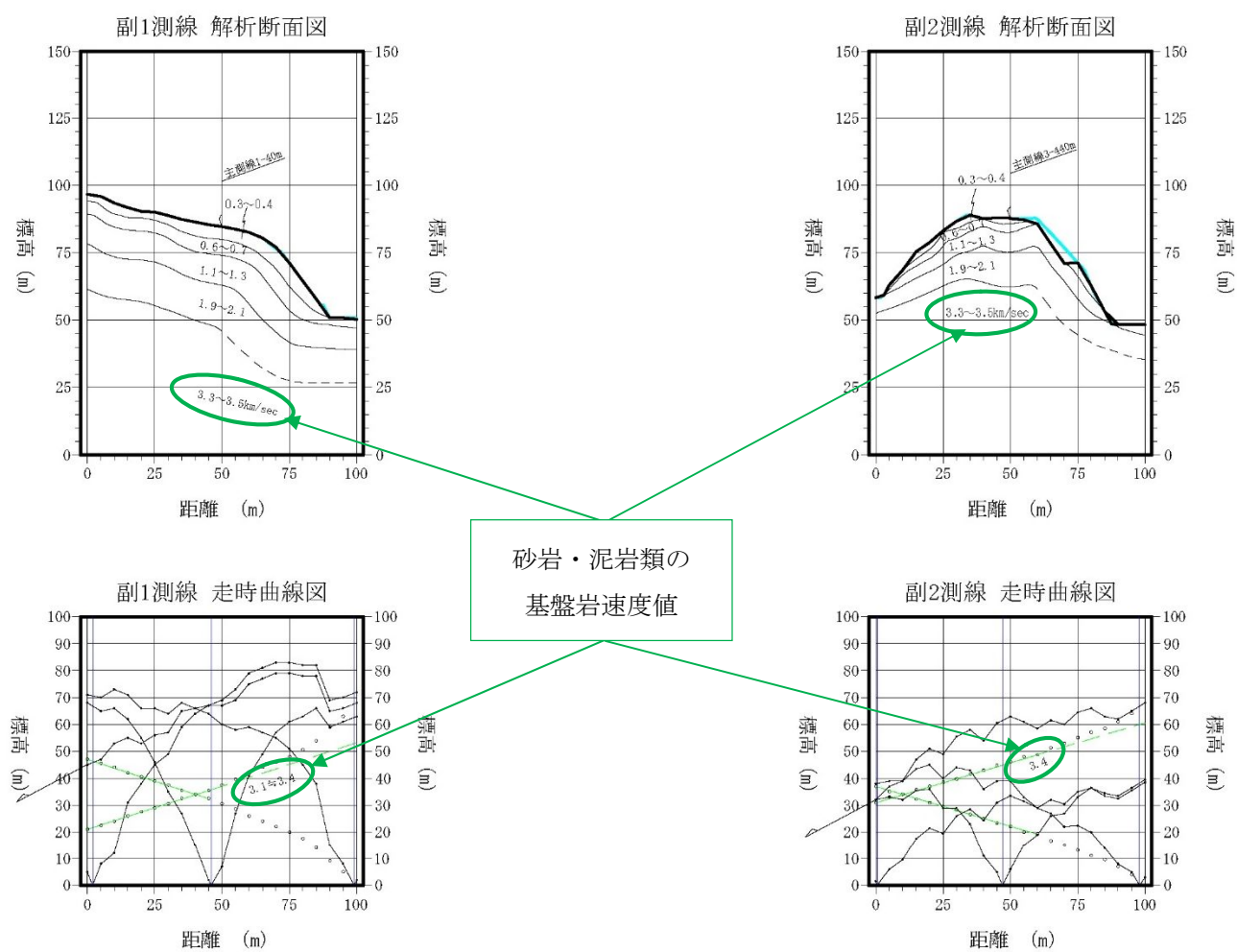
(上段は屈折解析図、下段は走時曲線図)

図 4.3.5 はざとり法による弾性波探査結果図 主測線 2 (S=1:2, 500)



(上段は屈折解析図、下段は走時曲線図)

図 4.3.6 はざとり法による弾性波探査結果図 主測線 3 (S=1:2,500)

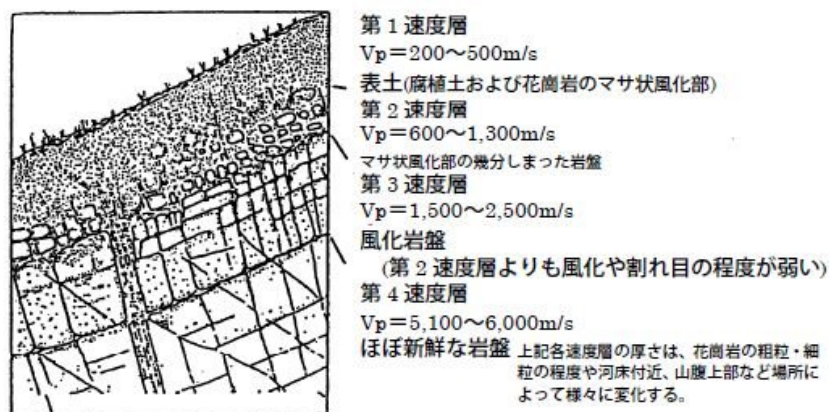


(上段は屈折解析図、下段は走時曲線図)

図 4.3.7 はざとり法による弾性波探査結果図 副測線 1、副測線 2 (S=1:2, 500)

弾性波速度には、地盤を構成する土質・岩石自体の鉱物組成や粒子構成、粒子の固結度、空隙率、風化・変質状況や岩盤自体の割れ目状況、地圧状況等が反映される。一般的な地盤と弾性波速度との関係を図 4.3.8 に示す。

一般に弾性波速度が速いほど岩の強度も大きくなり、深度が大きくなるにつれ地山の風化程度も弱くなり弾性波速度も速くなる、という規則性がある。はざとり法はこの規則性を前提としたもので、弾性波観測データを解析することにより、弾性波速度層の分布状況を求めるものである。



物理探査学会 (2000) 「物理探査適用の手引き」

図 4.3.8 花崗岩の一般的な風化状況と速度層

弾性波探査によりえられた走時曲線及びはざとり法による速度分布図を図 4.3.9 に、速度層断面図を図 4.3.4～図 4.3.7 に示し、地表地質踏査やボーリング地点における波速度層分布と地質状況との対比から、各速度層についてまとめたものを表 4.3.1 に示す。はざとり法により、当調査地域での速度分布は、下表の通り以下の5層に区分された。

表 4.3.1 速度層構成

速度層	弾性波速度 ($V_p=\text{km/sec}$)	推定地質状況
第1速度層	0.3~0.4	表土、崖錐堆積物の未固結堆積物 砂岩・泥岩類、火山岩類の強風化岩帯
第2速度層	0.6~0.7 , 0.7~0.8	礫混じり砂、礫混じりシルト等の崖錐堆積物 砂岩・泥岩類、火山岩類の強風化岩帯
第3速度層	1.1~1.3 , 1.4~1.6	未固結~半固結状の礫混じり土砂等 砂岩・泥岩類、火山岩類の上部風化岩帯
第4速度層	1.9~2.1 , 2.1~2.3	半固結状の礫混じり土砂等 砂岩・泥岩類、火山岩類の下部風化岩帯
第5速度層	3.3~3.5 , 4.0~4.2	砂岩・泥岩類の新鮮堅硬な基盤岩 速度の違いは熱変成の変成度の違いと推察 4.0km/sec 層は熊野酸性岩類が分布する可能性もある
	— — — — —	低速度帯(数値は区間速度) Δt は区間の時間差

各速度層の分布・地質状況推定すれば、以下の通りである。

第1速度層 (0.3～0.4km/sec)

本速度層は、いわゆる表土及び崖錐堆積物に相当すると思われる。

岩級区分ではD級に対応すると思われる。

第2速度層 (0.6～0.7, 0.7～0.8km/sec)

本速度層は崖錐堆積物又は、強風化岩帯に相当するものと思われる。岩級区分ではD級相当に対応すると思われる。

第3速度層 (1.1～1.3, 1.4～1.6km/sec)

本速度層は未固結～半固結状の礫混り土砂又は、第4速度層から更に風化の進んだもので上部風化岩に相当し、岩級区分ではCL級～CM級に対応すると思われる。

第4速度層 (1.9～2.1, 2.1～2.3km/sec)

本速度層は、第5速度層の風化の進んだもので割れ目の発達した下部風化岩帯に相当し、CM級に相当すると思われる。

第5速度層 (3.3～3.5, 4.0～4.2km/sec)

本速度層は地表から直接風化の及ばない新鮮堅硬な岩盤に相当すると思われる。主に砂岩・泥岩類のCH級と考えられるが、4.0～4.2 km/sec 帯では火山岩類（石英斑岩や玢岩）による熱変成を強く受けてより硬い砂岩・泥岩類が分布しているものと推察されるが、熊野酸性岩が出現する可能性もある。

低速度帯

本調査で得られた低速度帯は、図 4.3.9 速度分布図、前述の図 4.3.4～図 4.3.7 解析断面図および、表 4.3.2 低速度帯概要一覧表に示した通りである。

一般に弾性波探査で得られる低速度帯は下記の様な事が考えられるが、地質踏査では断層や変質帯、貫入岩帯は確認できなかったため、亀裂集中帯の可能性が高いと推察される。

- ① 断層破碎帯
- ② 変質帯及び、貫入岩帯近傍
- ③ 垂直亀裂の集中帯
- ④ 基盤岩の形状が谷地形又は凹地形を示す場合
- ⑤ 断層もしくは亀裂密集帯等の劣化帯に相当すると考えられる。

表 4.3.2 低速度帯概要一覧表

測線名	はざとり線上の 低速度部区間	時間差 Δt (msec)	パス計算後の 位置 (m)	パス計算後の 速度値 (km/sec)	備考
主測線 1	305～380	4	315～380	2.2	亀裂集中帯
主測線 2	60～105	6	85～105	2.3	亀裂集中帯
主測線 2	540～585	7	530～560	2.0	亀裂集中帯
主測線 3	305～355	9	305～340	1.9	亀裂集中帯

*低速度帯の信頼度は時間差（ Δt msec）が大きいほど可能性が大きい。

P波速度の岩種別統計値を表 4.3.3 に示す。同表によると、当該地山と同種岩石は石英斑岩と玢岩は花崗岩のP波速度と、熊野層群の堆積岩類は新第三紀堆積岩類の砂岩類、泥岩（頁岩）類、互層類のP波速度に相当するが、当該地域の熊野層群は熱変成を被っているため中生代堆積岩相当に硬質となり、中生代堆積岩相当の弾性波速度が得られていると考えられる

中生代堆積岩砂岩類	$V_p=4.16 \pm 0.24 \text{ km/s}$ (2.70～5.31km/s)
中生代堆積岩頁岩類	$V_p=4.02 \pm 0.17 \text{ km/s}$ (2.83～5.28km/s)
中生代堆積岩互層類	$V_p=3.93 \pm 0.09 \text{ km/s}$ (2.26～5.26km/s)
花崗岩	$V_p=4.29 \pm 0.06 \text{ km/s}$ (2.95～5.90km/s)

当該地山の基盤となる熊野層群の第5速度層（3.3～3.5, 4.0～4.2km/s）はこれとほぼ同様である。4.0～4.2 km/sec 帯では火山岩類（石英斑岩や玢岩）による熱変成を強く受けてより硬い砂岩・泥岩類が分布していると考えられる。また、一部には熊野酸性岩が出現する可能性も考えられる。

石英斑岩は斜面中腹から尾根部にかけて分布し、トンネル掘削面付近には確認されていない。石英斑岩の第5速度層（3.3～3.5km/s）であり、斑岩の最小～平均速度とほぼ同様である。

表 4.3.3 P 波速度の岩種別統計値

岩石名	N	平均値(km/sec)	分散(km/sec)	MAX(km/sec)	MIN(km/sec)
深成岩	326	4.32 ± 0.06	0.2885	5.90	2.64
橄欖岩・斑糲岩	11	4.78 ± 0.29	0.1883	5.48	4.00
閃緑岩	59	4.35 ± 0.16	0.3561	5.85	2.64
花崗岩	256	4.29 ± 0.06	2.2656	5.90	2.95
半深成岩	173	4.14 ± 0.08	0.3095	5.66	2.94
輝緑岩	13	4.30 ± 0.27	0.2025	4.91	3.42
ヒン岩	16	4.45 ± 0.38	0.5966	5.36	3.00
斑岩	144	4.10 ± 0.09	0.2778	5.66	2.94
火山岩	252	3.25 ± 0.08	0.4231	5.09	1.63
細分できない火山岩	59	3.03 ± 0.16	0.3664	5.00	1.63
下記三種の小計	193	3.32 ± 0.10	0.4538	5.09	1.85
玄武岩	20	3.83 ± 0.25	0.2910	4.79	3.02
安山岩	124	3.26 ± 0.12	0.4787	5.09	1.85
流紋岩	49	3.27 ± 0.17	0.3533	4.71	2.00
古生代堆積岩	297	4.21 ± 0.07	0.3584	6.00	2.64
石灰岩	11	5.23 ± 0.47	0.4904	6.00	4.21
輝緑凝灰岩	20	4.50 ± 0.24	0.2573	5.22	3.61
砂岩類	18	4.25 ± 0.32	熊野層群は地質時代から新第三紀下部堆積岩に該当するが、熱変成を被っているため中生代堆積岩相当の弾性波速度が得られていると考えられる		
頁岩類	78	4.11 ± 0.14			
チャート	23	4.11 ± 0.29			
互層類	171	4.20 ± 0.08			
中生代堆積岩	254	3.98 ± 0.08			
輝緑凝灰岩	6	4.43 ± 0.59	0.3140	4.95	3.40
砂岩類	33	4.16 ± 0.24	0.4422	5.31	2.70
頁岩類	46	4.02 ± 0.17	0.3351	5.28	2.83
礫岩	7	3.66 ± 0.69	0.5617	4.43	2.50
互層類	167	3.93 ± 0.09	0.3545	5.26	2.26
古第三紀堆積岩	55	3.20 ± 0.17	0.4027	4.46	2.23
砂岩類	5	3.07 ± 0.91	0.5425	3.70	1.80
頁岩類	6	2.91 ± 0.84	0.6446	4.00	2.23
互層類	42	3.23 ± 0.18	0.3466	4.46	2.28
新第三紀中下部堆積岩	277	2.66 ± 0.07	0.3072	4.78	1.52
礫岩	4	3.64 ± 1.38	0.7500	4.78	2.68
角礫凝灰岩	46	3.07 ± 0.11	0.1391	4.48	2.11
凝灰岩	45	2.77 ± 0.11	0.1314	3.79	2.02
砂岩類	12	2.67 ± 0.30	0.2336	3.27	1.98
頁岩類	29	2.54 ± 0.21	0.3089	3.40	1.70
互層類	150	2.52 ± 0.12	0.5169	4.20	1.52
新第三紀上部堆積岩	128	2.20 ± 0.07	0.1771	3.85	1.64
角礫凝灰岩	15	2.56 ± 0.27	0.2395	3.85	2.18
頁岩類	17	2.12 ± 0.18	0.1250	3.02	1.67
凝灰岩	27	2.09 ± 0.08	0.0423	3.60	1.73
砂岩類	10	2.01 ± 0.22	0.0956	2.70	1.64
互層類	60	2.23 ± 0.12	0.2149	3.50	1.68
広域変成岩(除蛇紋岩)	223	4.27 ± 0.07	0.2633	5.92	2.93
結晶片岩	149	4.30 ± 0.08	0.2799	5.92	2.93
千枚岩	32	4.23 ± 0.17	0.2160	5.13	3.24
片麻岩	42	4.17 ± 0.15	0.2432	5.09	3.02
蛇紋岩	17	3.76 ± 0.37	0.5006	5.00	2.50
ホルンフェルス	48	4.52 ± 0.18	0.3711	5.50	3.11

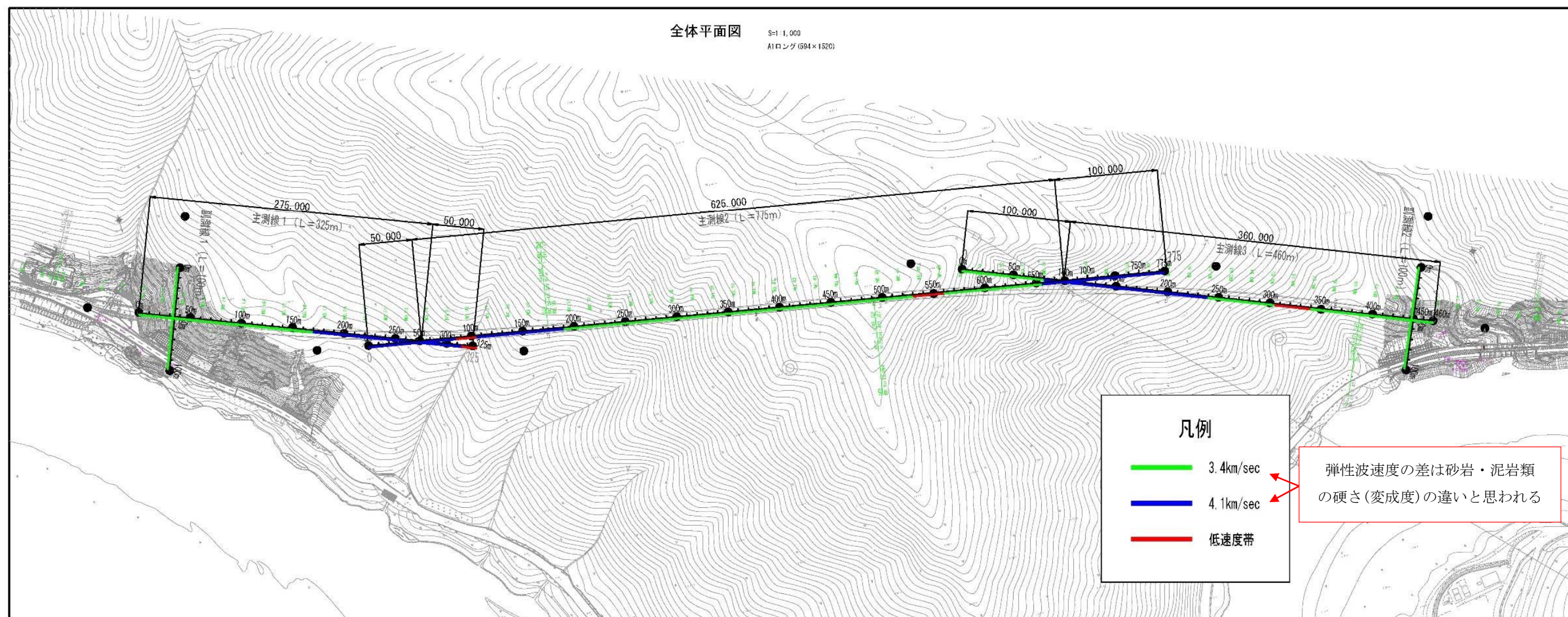


図 4.3.9 はざとり法による基盤岩速度（第5速度層、低速度帯）分布図（S=1:5,000）

4.4 トモグラフィー手法を用いた解析

高精度弾性波探査解析は、トモグラフィー的手法を用いたもので、解析は次の手順で行われる。

4.4.1 走時曲線のチェック

コンピュータ上でデータ（走時曲線）のチェックを行う。

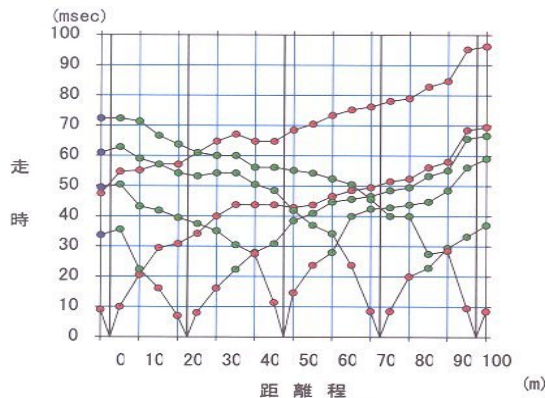


図 4.4.1 走時曲線

4.4.2 モデル断面の作成

トモグラフィー的解析の基礎となるモデル断面を作成する。モデル断面ははざとり解析手法をベースとした層構造（深度とともに速度が大きくなるような構造）が一般的である。

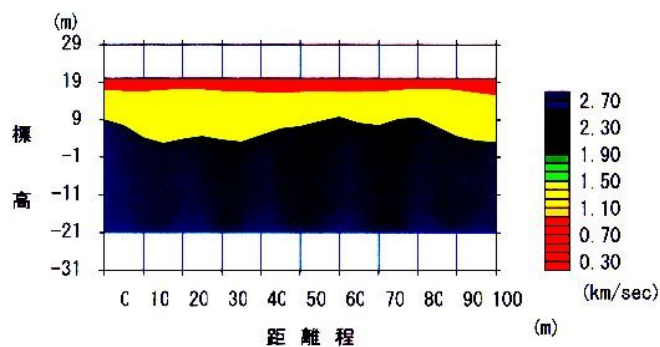


図 4.4.2 モデル断面の作成

4.4.3 理論走時と観測走時の反復計算

コンピュータを用いてホイヘンスの原理に基づくパス計算（理論走時）を行い、理論走時と実際に観測された走時との差が限りなく小さくなるまで、モデル断面を修正しながら解析を行う。これは、従来の「はざとり法」における解析者の経験に基づく主観的判断を排除しようというものである。

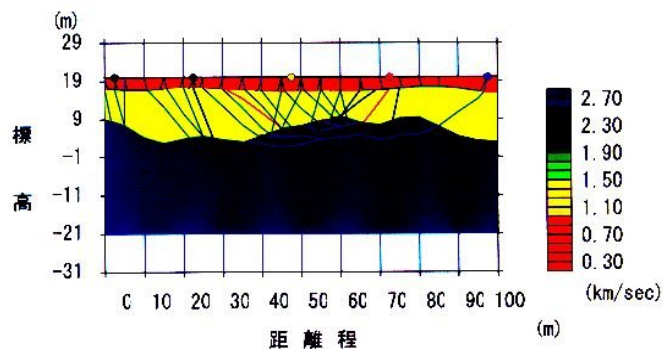


図 4.4.3 弾性波路の計算状況

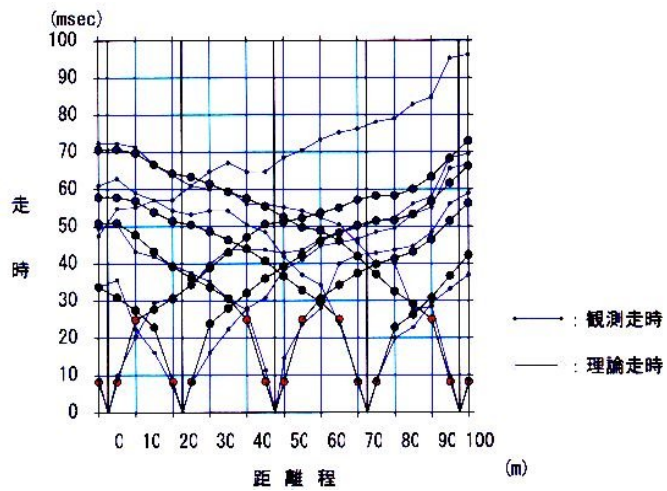
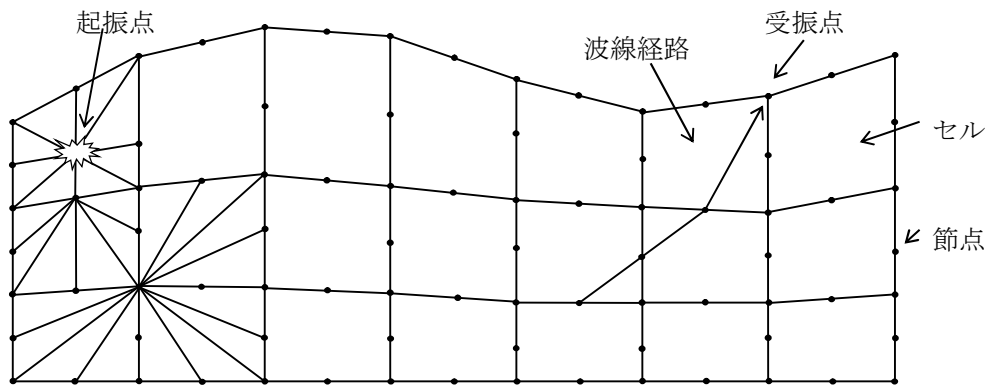


図 4.4.4 理論走時と観測走時のチェック
(2つの走時曲線がほぼ一致するまで、モデル断面を修正する)



- ・速度層断面を複数の四辺形（セル）に近似する。各セル内の弾性波速度は一定とする。
- ・各セルの周边上（速度境界上）に複数の節点を設ける。
- ・起振点から射出された波線は、これらの節点間をたどるものとする。
- ・起振点～受振点間の初動走時は、これらの節点をたどる全ての経路のうち、最も走時の短い経路の走時とする。

図 4.4.5 ホイヘンスの原理による理論走時（初動走時）の計算

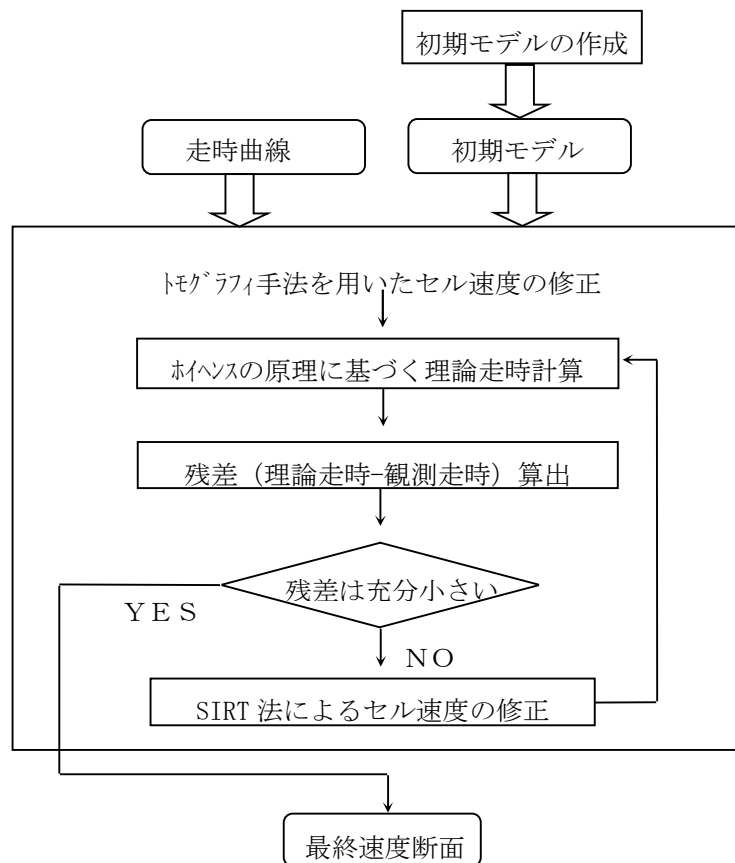


図 4.4.6 高精度屈折法地震探査の流れ

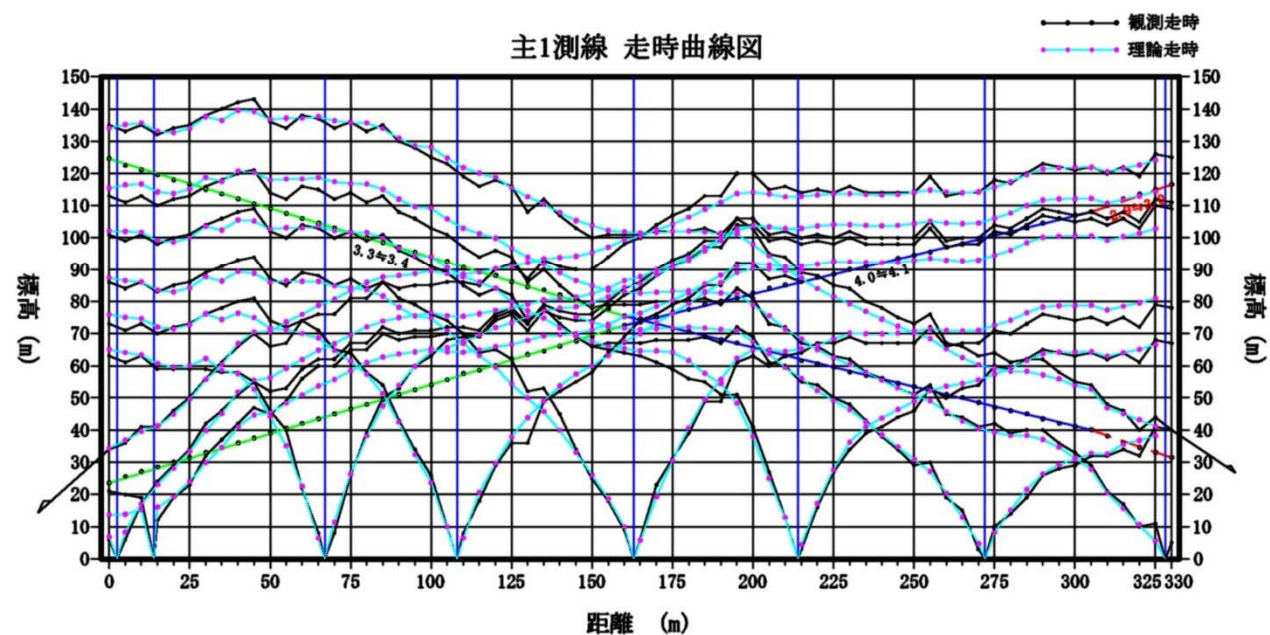
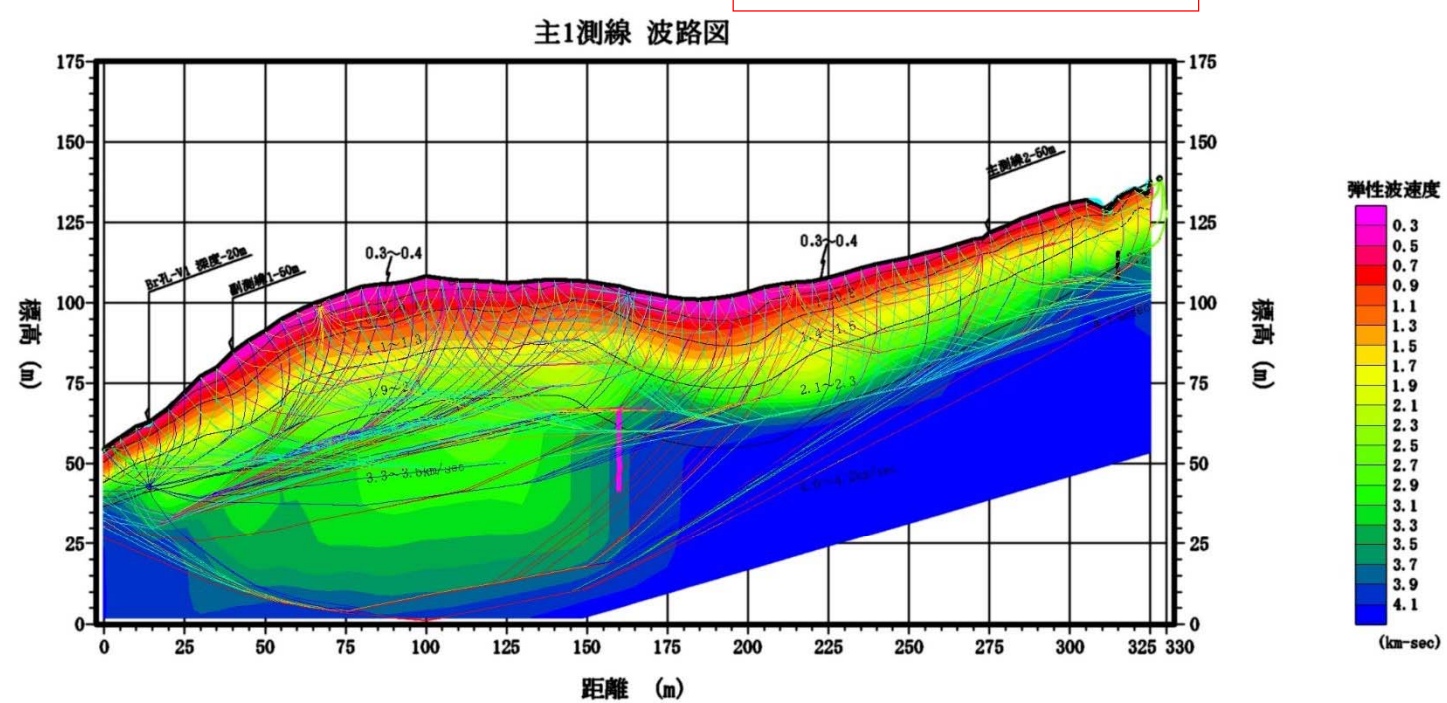
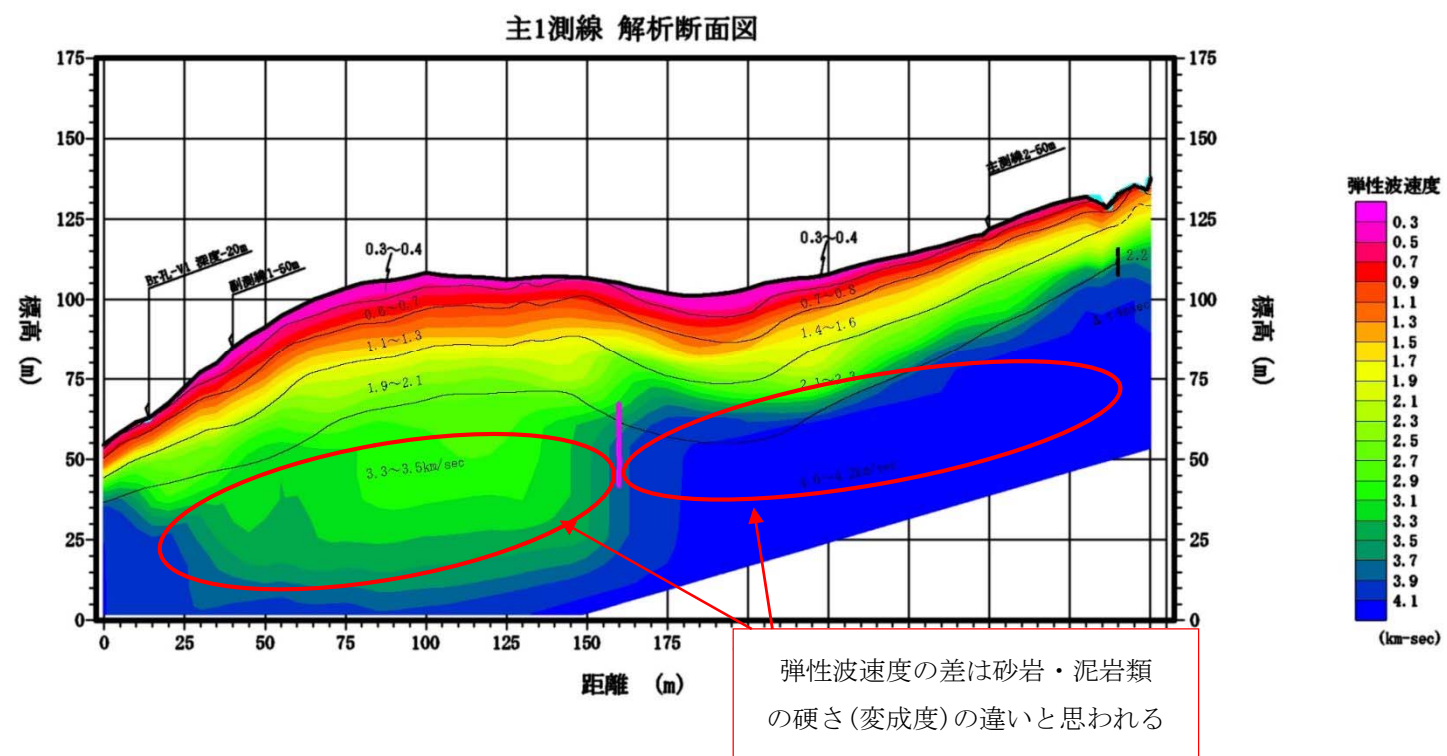
4.4.4 解析断面のチェック

一般的には、(3)で作成した解析断面に、地表踏査や調査ボーリング等の地質データを加味して、再度(3)のモデル断面を作成することとなる。

4.4.5 解析結果

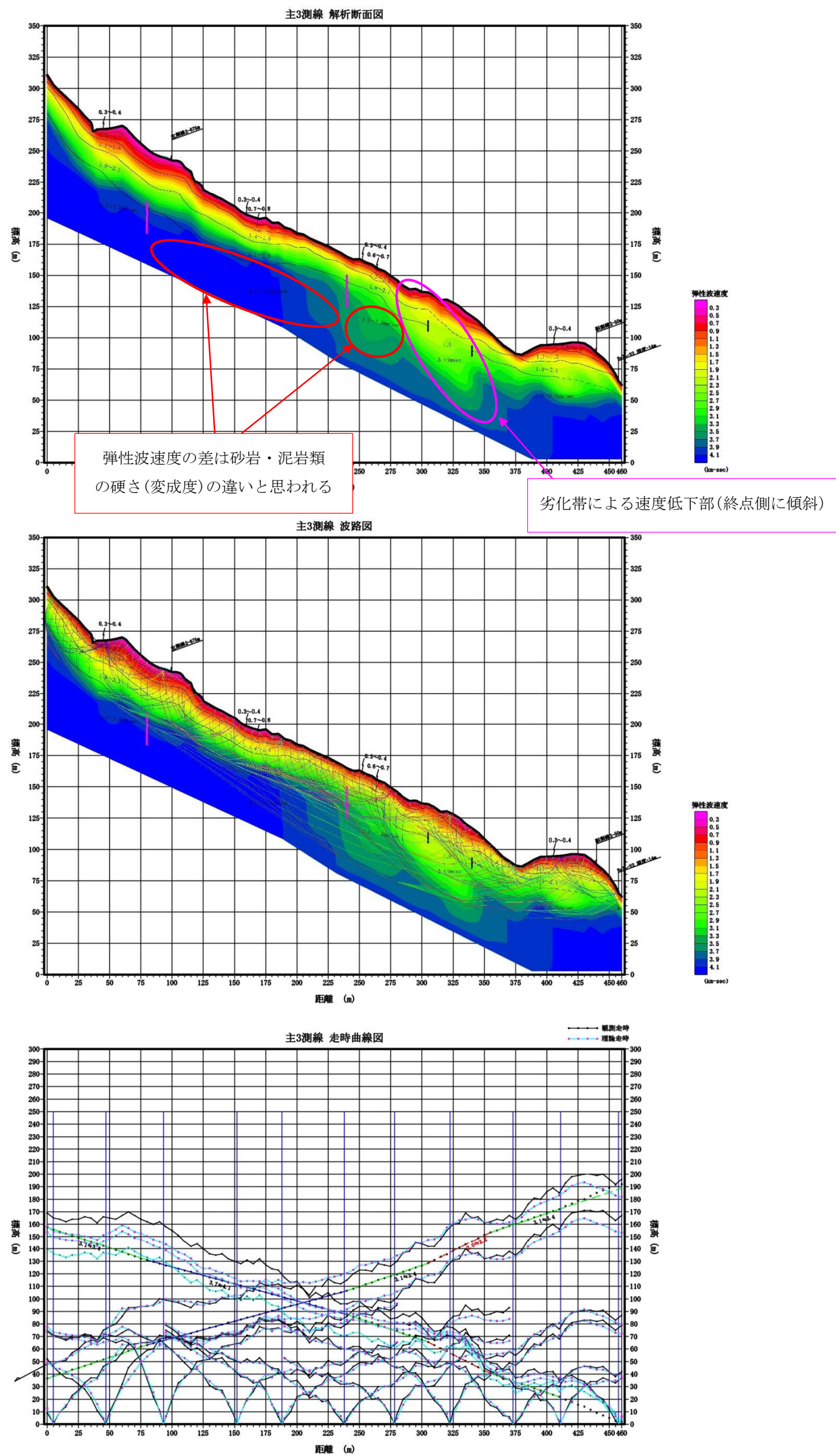
解析結果は高精度解析断面図に示した。解析結果例を図 4.4.7～図 4.4.10 に示す。

なお、高精度解析において、A 測線の測点 480m の尾根部に低速度部が解析される。これらの低速度帯は、p. 4-26 “(参考資料)高精度解析による尾根部に見られる低速度帯について” に示す様に計算上現れる偽像と判断される。



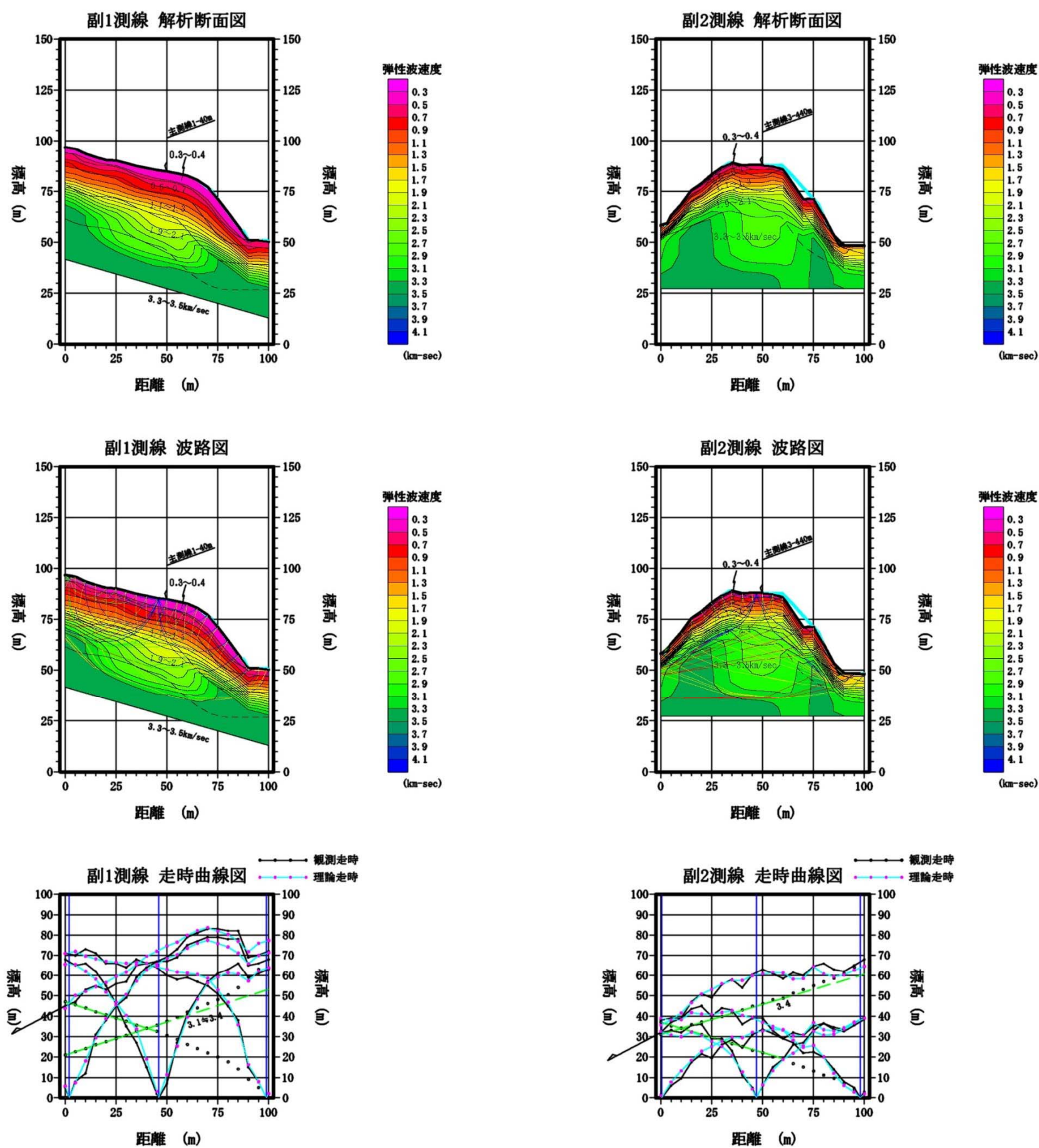
(上段は高精度解析結果図、中断は波路図、下段は走時曲線図)

図 4.4.7 高精度解析結果図 主測線 1 (S=1:2, 500)



(上段は高精度解析結果図、中断は波路図、下段は走時曲線図)

図 4.4.9 高精度解析結果図 主測線 3 (S=1:2, 500)



(上段は高精度解析結果図、中断は波路図、下段は走時曲線図)

図 4.4.10 高精度解析結果図 副測線 1, 副測線 2 (S=1:2, 500)

(参考資料) 高精度解析による尾根部に見られる低速度帯について
高精度解析において、尾根部に低速度帯が解析されることがあり、これらの低速度帯の一部は、下記のように計算上現れる偽像と判断される。

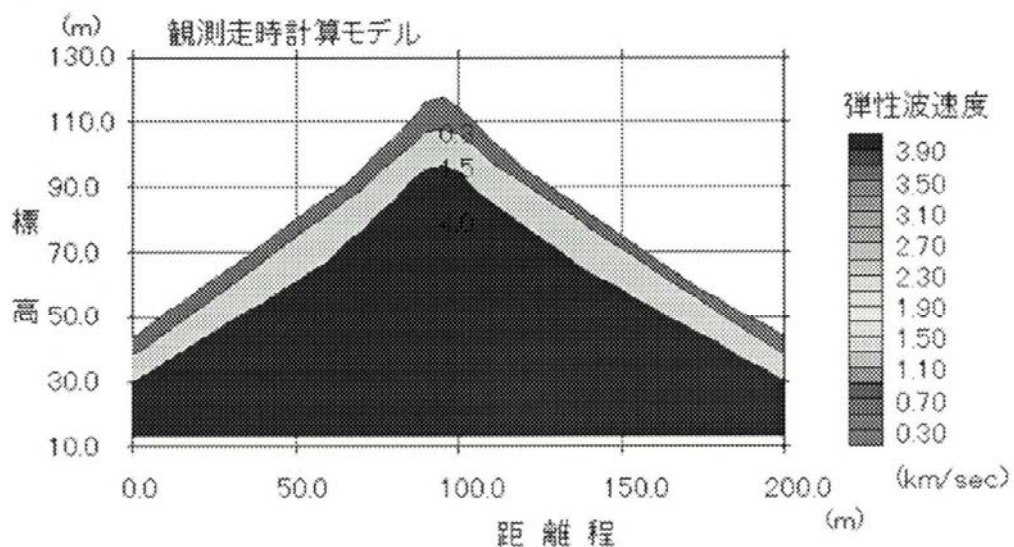
尾根部に見られる低速度帯について

PlotRefa を用いて高精度屈折法地震探査の解析を行なった場合、しばしば尾根部に低速度帯を思わせる構造が現れることがあります。

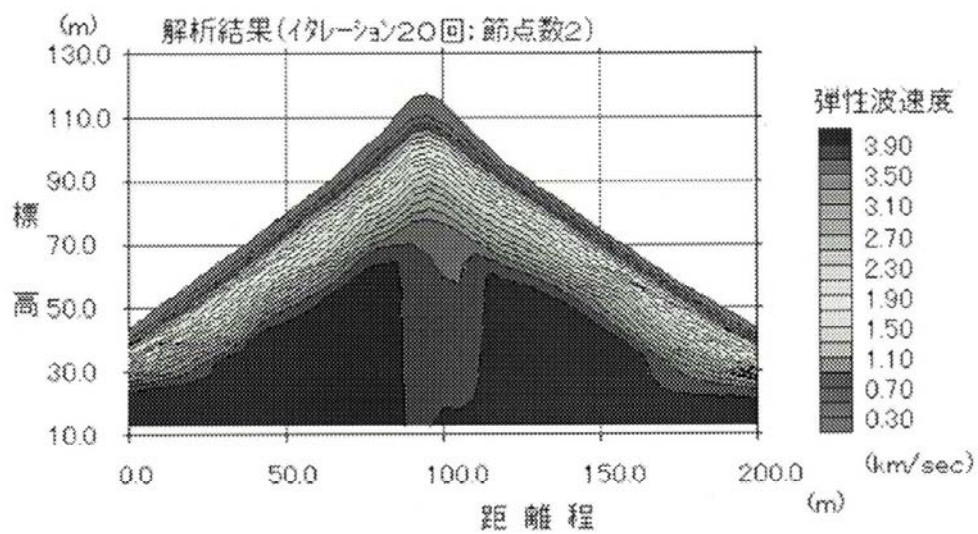
これは、解析および解釈時に注意すべき点と思われるので、ここにモデル計算例を示します。

1. 偽像が現れた例

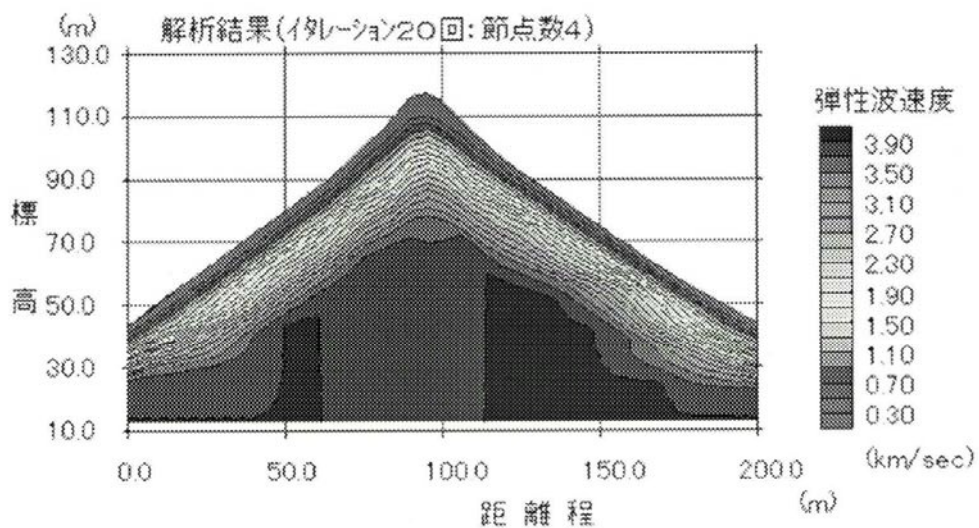
下の図は、速度構造モデルです。このモデルに対して計算した理論走時を観測走時と考へて解析を行ないました。



下の図は、トモグラフィ解析（ミラージ構造）の解析結果です。節点数は2、イタレーション 20 回後の結果です。コンター設定によって見た目のイメージが変わる可能性があります。尾根直下が有意に低速度になっている（偽像が生じた）ことがわかります。



下の図は、同じ走時を用いましたが、節点数を4にして解析した結果です。上の図に比較して偽像が目立たないことがわかります（コンターの設定は同じです）。



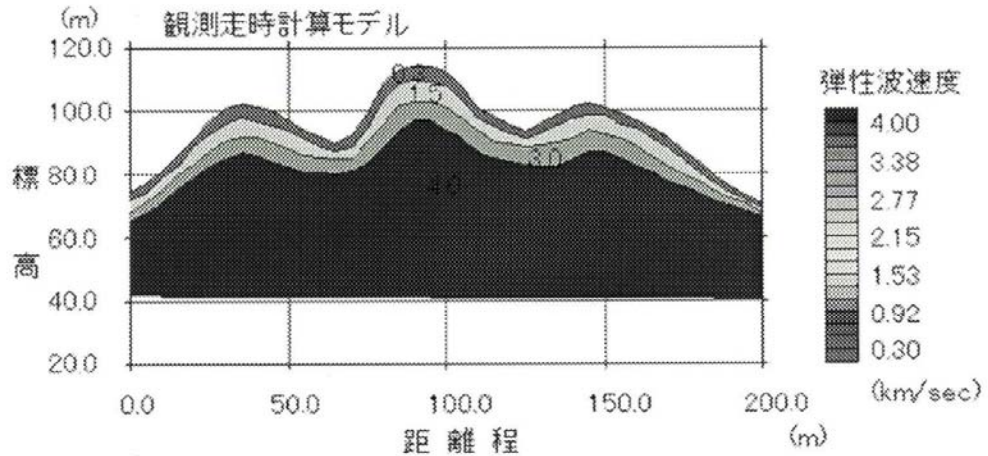
この結果から以下のようなことがわかります。

- * 走時計算の精度が十分でない場合、尾根部に低速度の偽像を作り出す可能性があります。
- * 走時計算の精度が十分でない場合、この程度 of 速度構造の違いを生じる可能性があります。

2. 偽像が現れない例

モデル計算における上記のような偽像は、尾根があるからといって必ず現れるわけではなく現れない場合も多くあります。以下は偽像が現れない計算例です。

下の図に速度構造モデルを示します。このモデルに対して計算した理論走時を観測走時と考えて解析を行ないました。



下の図は、トモグラフィ解析（ミラージ構造）の解析結果です。節点数は2、イタレーションは20回行いました。

尾根下に低速度の偽像は見られず、正しい結果が得られていることがわかります。このように、同じ節点数で計算しても偽像が現れる場合と現れない場合があります。