

JNC TJ7440 2000-004

屈折法弾性波探査における
インバージョン解析と統計的速度区分

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

基礎地盤コンサルタンツ株式会社

本資料の全部または一部を複写・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

屈折法弾性波探査におけるインバージョン解析と統計的速度区分
(契約業務報告書)

八野祐二* 中司龍明*

要 旨

本報告書は、月吉断層規模の地質構造について、通常の屈折法で用いられる萩原の方法で解析した場合と、インバージョン技術で解析した場合とで、解析精度の違いの有無を確認し、断層調査への適用性を把握するために、既存データによる再解析を実施したものである。

屈折法弾性波探査の速度走時を、統計的および定量的に整理して、従来法での速度層区分の品質保証資料の作成を試み、合わせてインバージョン技術を応用した解析と品質面での比較を行った。また、月吉断層の物理的性質をパラメータとした感度解析結果から、断層の検出を目的とした場合の適切な調査計画について整理した。

結果として、萩原の方法とインバージョン法とでは、観測走時と理論走時との全体的な誤差はそれほど変わらないが、インバージョン法は断層の幅や傾き等の詳細な地質構造を把握できる可能性があるという結果が得られた。

最後に、インバージョン法の中で今回用いた手法では、その連続体を仮定した解析原理から、急激な速度境界面の解析には不向きで、物理探査における屈折法探査としては、萩原の方法と併用して行く必要があると考えられる。また、地質技術者が屈折法の解析断面図を地質構造解釈する場合に、今までの萩原の方法で3～4層程度に解釈された図に対しては慣れているが、今回のインバージョン法で得られる多層速度構造に対しては、地質パターンと速度構造とを対応付けるため、経験を積み重ねる必要があると考えられる。

本報告書は、基礎地盤コンサルタンツ株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：11C1445

機構担当部課室：東濃地科学センター 地層科学研究グループ 中野勝志

* 基礎地盤コンサルタンツ株式会社地質部

Inverse Analysis and Statistical Velocity Distribution
in Seismic refraction Survey

Y.Hachino* T.Nakazuka*

Abstract

As for this report, about the geological structure of the scale Tsukiyoshi fault , A re-analysis by the existent data was enforced to confirm the existence of the difference between Hagiwara method which is usually used in the refraction method and inversion technology in the analytic precision and to grasp application to the fault investigation.

The velocity travel-time of the seismic refraction method was put in order statistically and quantitatively, and it tried the preparation of the quality guarantee materials of the velocity layer classification with before method, and the analysis which inversion technology was applied to together, and comparison on the quality side were done. And, it was put in order about the proper investigation plan when it aimed at the detection of a fault from the result of a sensitivity analysis which made the physical nature of Tsukiyoshi fault a parameter.

Consequently, though a general error between the observed travel-time and the theoretical travel-time was not so different with Hagiwara's method and inversion method, inversion method could get a result with the possibility to grasp detailed geological structure such as the width of a fault and inclination.

Because of the analytic principle which that continuous body was supposed and it is not useful for the analysis of the rapid velocity boundary side, inversion method is used with Hagiwara's method together as a method of geophysical investigation.

This work was performed by Kiso-Jiban Consultants Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

JNC Liaison : Geoscience Research Execution Group, Tono Geoscience Center

* Geology Division, Kiso-Jiban Consultants Corporation.

目 次

ページ

| | | |
|-----------------------------|-------|----|
| 1. 緒論 | ----- | 1 |
| 2. 本論 | ----- | 2 |
| 2. 1. 業務概要 | ----- | 2 |
| 2. 2. インバージョン技術による既存データの再解析 | ----- | 5 |
| 2. 3. 統計的速度区分の試行 | ----- | 18 |
| 2. 4. 屈折法による速度区分の品質整理 | ----- | 20 |
| 2. 5. インバージョン技術を応用した感度解析 | ----- | 29 |
| 2. 6. 考察 | ----- | 47 |
| 3. 結論 | ----- | 49 |
| 謝 辞 | ----- | 51 |
| 参考文献 | ----- | 52 |

添付資料

付図-1 インバージョン法解析結果図 (1/1000 低速度帯がある場合)

付図-2 インバージョン法解析結果図 (1/1000 低速度帯がない場合)

付図-3 インバージョン法解析結果図 (1/1000 均一モデルの場合)

| | | | |
|---------|---|-------|----|
| 図 2.1-1 | 既存弾性波測線位置図 | ----- | 4 |
| 図 2.2-1 | 解析の流れ図 | ----- | 7 |
| 図 2.2-2 | 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果 | ----- | 10 |
| 図 2.2-3 | 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果 | ----- | 11 |
| 図 2.2-4 | 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図) | ----- | 12 |
| 図 2.2-5 | 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図) | ----- | 13 |
| 図 2.2-6 | 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図) | ----- | 14 |
| 図 2.2-7 | 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図) | ----- | 15 |
| 図 2.2-8 | 5km/s 均一速度層を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図) | ----- | 16 |
| 図 2.2-9 | 5km/s 均一速度層を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図) | ----- | 17 |
| 図 2.3-1 | 基盤の速度走時線 (はぎとり線) 図 | ----- | 19 |
| 図 2.4-1 | 萩原の方法による観測走時と解析走時の比較図(低速度帯がある場合) | | 22 |
| 図 2.4-2 | 萩原の方法による観測走時と解析走時の比較図(低速度帯がない場合) | | 22 |
| 図 2.4-3 | 低速度帯がある場合のインバージョン法解析結果(3)(収束状況) | | 23 |
| 図 2.4-4 | 低速度帯がある場合のインバージョン法解析結果(4)(誤差分布) | | 24 |
| 図 2.4-5 | 低速度帯がない場合のインバージョン法解析結果(3)(収束状況) | | 25 |
| 図 2.4-6 | 低速度帯がない場合のインバージョン法解析結果(4)(誤差分布) | | 26 |
| 図 2.4-7 | 均一速度モデルによるインバージョン法解析結果(3)(収束状況) | | 27 |
| 図 2.4-8 | 均一速度モデルによるインバージョン法解析結果(4)(誤差分布) | | 28 |
| 図 2.5-1 | ケース 1 のモデル解析結果 | ----- | 35 |
| 図 2.5-2 | ケース 2 のモデル解析結果 | ----- | 36 |
| 図 2.5-3 | ケース 3 のモデル解析結果 | ----- | 37 |
| 図 2.5-4 | ケース 4 のモデル解析結果 | ----- | 38 |
| 図 2.5-5 | ケース 5 のモデル解析結果 | ----- | 39 |
| 図 2.5-6 | ケース 6 のモデル解析結果 | ----- | 40 |
| 図 2.5-7 | ケース 7 のモデル解析結果 | ----- | 41 |
| 図 2.5-8 | ケース 8 のモデル解析結果 | ----- | 42 |

| | | | |
|----------|-----------------------------|-------|-----|
| 図 2.5-9 | ケース 9 のモデル解析結果 | ----- | 4 3 |
| 図 2.5-10 | ケース 10 のモデル解析結果 | ----- | 4 4 |
| 図 2.5-11 | 起振点間隔の違いによるモデル解析結果①(速度分布図) | ----- | 4 5 |
| 図 2.5-12 | 起振点間隔の違いによるモデル解析結果②(波線図) | ----- | 4 6 |
| | | | |
| 表 2.2-1 | 従来の弾性波探査と高密度弾性波探査の違い | ----- | 5 |
| 表 2.2-2 | 再解析に使用する屈折法データの諸元 | ----- | 6 |
| 表 2.2-3 | 解析波線数及びメッシュ数 | ----- | 7 |
| 表 2.2-4 | 初期モデルとして使用した萩原の方法による解析結果の特徴 | ----- | 8 |
| 表 2.3-1 | 速度走時より求めた各回帰直線での平均二乗残差 | ----- | 1 9 |
| 表 2.5-1 | 断層モデル解析時の解析条件 | ----- | 2 9 |
| 表 2.5-2 | モデル解析に用いた各地層の層厚と速度値 | ----- | 2 9 |
| 表 2.5-3 | モデル解析に用いた断層の幅、角度、速度値 | ----- | 3 0 |
| 表 2.5-4 | 各起振点間隔での解析波線数 | ----- | 3 0 |
| 表 2.5-5 | 各パラメータ変化に対して得られた速度構造の特徴 | ----- | 3 2 |

1. 緒論

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターにおける地層科学研究では、地質環境の調査技術・評価手法を開発することを大きな目的の1つとして、広域地下水流動研究が進められている。また、地下水の流動を規制するような断層について、地表からの物理探査によってできるだけ精度良くその位置、性状を把握する技術を確立することは、地層科学研究における広域地下水流動研究テーマの上で重要である。

屈折法弾性波探査は反射法に比べて測定が簡便で、速度値が求まるということから多用されているが、反面、解析者による主観が強く解析結果に影響すると言われている。本業務では、従来の屈折法解析とインバージョン技術を応用した屈折法解析のそれぞれの品質について、定量的に比較できるように試みた。

さらに、地質環境の持つ不均質性を、屈折法弾性波探査においてどのように表現するかは、データの品質保証の観点から重要である。本業務では、統計的処理を試行することで、屈折法弾性波探査における品質保証の方法について1つの方向性確認を行った。

また、再解析に供する既往屈折法探査データをモデルデータとして、最適な断層の検出を目的とした屈折法探査計画を検討するために、断層規模（幅）や物理的性質（速度）、角度などをパラメータとして感度解析を行い、モデルごとに解析した。

多くの起振点を必要とする反射法を広範囲に適用することが難しいサイトでは、比較的点数の少ない屈折法が有効である。そのためにも、ジオトモグラフィ技術を応用した屈折法探査技術によって感度解析を行うことは、当該研究地域以外にインバージョン技術を適用するときの重要な基礎資料となりえるものとする。

2. 本論

2. 1. 業務概要

①件 名：屈折法弾性波探査におけるインバージョン解析と統計的速度区分的

②目 的：

- a. 月吉断層規模の地質構造について、通常の屈折法で用いられる萩原の方法で解析した場合と、より新しい技術で解析した場合とで、解析精度の違いの有無を確認し、断層調査への適用性を把握すること
- b. 屈折法弾性波探査の走時の採り方を、統計的（定量的）に整理して、従来法での速度層区分の品質保証資料の作成を試みることに、合わせてインバージョン技術を応用した解析と品質面での比較を行うこと
- c. 月吉断層の物理的性質をパラメータとした感度解析結果から、断層の検出を目的とした場合の適切な調査計画について整理すること

③発 注 者：核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター

④受 注 者：基礎地盤コンサルタンツ株式会社

⑤作業対象位置：岐阜県瑞浪市～土岐市（図 2. 1-1 既存弾性波測線位置図参照）

⑥作業期間：平成 12 年 1 月 18 日～3 月 1 0 日

⑦作業内容：a. インバージョン技術による既存データの再解析

b. 統計的速度区分の試行

c. 屈折法による速度区分の品質整理

d. インバージョン技術を応用した感度解析

⑧作業対象資料：既存弾性波探査データ（測点間隔：10m ピッチ、測線延長：1700m、起振源：70～160m 間隔 17 点、地形データ：10m ピッチ）

⑨解析結果概要：

- a. インバージョン解析結果では、走時データが少ないため明瞭ではないが、どのような初期モデルで解析しても距離程 500m 付近の谷部から基盤の距離程 500～600m 付近に、測線の終点（南側）に傾斜した低速度域が認められる。この低速度域は月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。また、初期モデルの基盤に低速度帯がある場合でもない場合でも、インバージョン結果としては同程度に収束した解を得ることができるが、基盤内の低速度域に関しては今回の走時データ量では、初期モデルを反映した結果となる。
- b. 萩原の方法とインバージョン法の両者の精度的な違いを定量的に述べるのは難しいが、萩原の方法では、各速度層の上面深度以上の層厚を持った均質な速度層が層状に分布する場合は有利であり、インバージョン法では、速度層境界での速度変化が急激でなく、速度が徐々に変化したり、同一地層内に速度の不均質が存在する場合に有利であると言える。実際に存在する地質構造は、多くの

場合、不均質と仮定できるので、基本的にインバージョン法を用い、走時曲線で明らかな速度急変部が存在する場合には初期モデルに萩原の方法による結果を使用し、それ以外の場合には均一速度初期モデルを使用することが屈折法による弾性波探査解析において有効であると考えられる。このように初期モデルを選択することによって、解析結果としての速度分布の信頼性を一層向上させることができる。

- c. 既存初動走時の再解析や感度解析結果から、断層破碎帯幅が断層上面深度の $1/5$ 程度以上かつ、断層破碎帯の速度が周囲の速度の $1/2$ 以下であれば、断層面を境界とした地層のずれが大きくなるとも、断層位置やその傾きを検知できる可能性がある。また、月吉断層を対象とする場合、基盤（土岐花崗岩）までの深度は $100\sim 150\text{m}$ 程度と見積もられる。その場合、中間層（瑞浪層群）も含む領域の弾性波速度分布を屈折法で求めるには、測線長： 500m 以上、起振点間隔： 80m 以下、受振点間隔： 10m 、最大波形到達距離： 500m 以上の測定が必要と考えられる。現実的には、地表付近の土中発破での地震波の最大到達距離は $200\sim 300\text{m}$ 程度であるので、孔内または水中起振する必要があると考えられる。

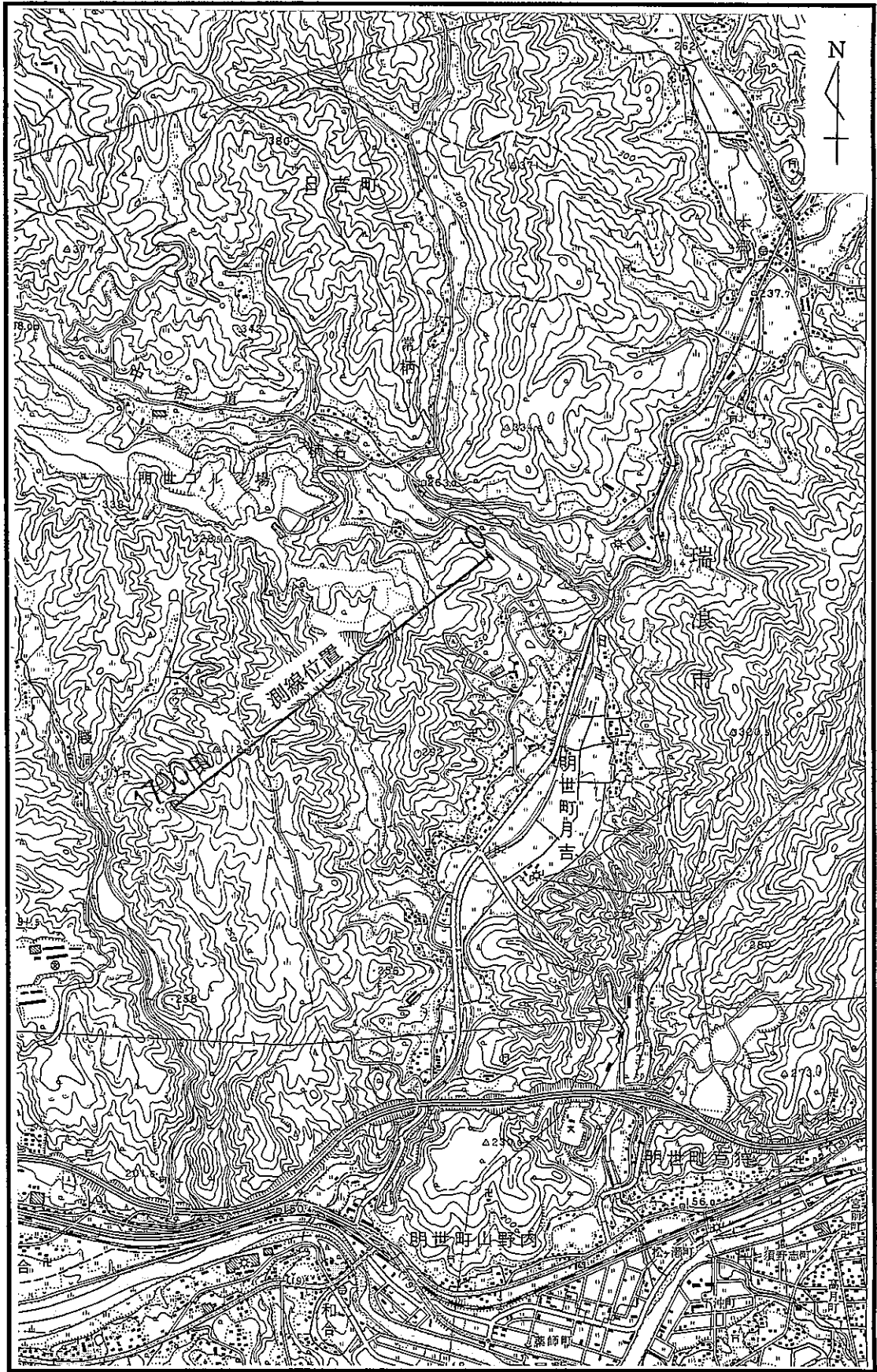


图 2. 1 - 1 既存弹性波测线位置图 (1/25,000)

2. 2. インバージョン技術による既存データの再解析

2. 2. 1. 解析方法

核燃料サイクル開発機構様から借用した弾性波探査資料を基に、インバージョン技術（ジオトモグラフィ的解析）を応用した手法を用いて速度分布を再解析した。解析には、基礎地盤コンサルタンツ（株）製の高密度弾性波探査解析プログラム「KisoSeis R99/Win」を使用した。トモグラフィ解析を応用した高密度弾性波探査と従来の弾性波探査の違いを表2. 2-1に示す。

表2. 2-1 従来の弾性波探査と高密度弾性波探査の違い

| 項目 | 従来の弾性波探査 | 高密度弾性波探査 |
|----|---|---|
| 測定 | 測定器：24チャンネル以下のアナログまたはデジタルデータ測定器 測点間隔：5または10m 取得データ：走時曲線で各層の傾きが読み取れるデータを取得する。 | 測定器：24または48チャンネル以上の多チャンネル・デジタルデータ測定器 測点間隔：従来と同様（必要に応じて2m程度） 取得データ：従来に比べて起振点・受振点を増やし大量のデータを取得する。 |
| 解析 | はぎとり法による層構造解析 | トモグラフィ解析 |
| 成果 | 走時曲線、速度層解析断面図 | トモグラフィ解析断面図、波線図 |
| 長所 | ・地表や地層境界の起伏が小さく、各速度層に厚みを持った層構造が想定できる地域では、層構造解析ができる。 | ・デジタルでデータを取得するため高品質のデータを取得・維持できる。 ・ボーリング孔を併用した測定も可能である。 ・層構造に拘束されない解析が可能である。 ・不均質な速度構造も解析できる。 ・ミラージュ層の解析ができる。 ・カラー断面図として可視化でき解り易い。 |
| 短所 | ・各速度層に厚みが無かったり、層構造が想定できない地域での解析は難しい。 ・ミラージュ層の解析ができない。 ・低速度帯の分布を垂直方向にしか表現できない。 ・走時曲線に対する地形の影響評価や屈折面、速度層境界の起伏、低速度帯決定に人為的な任意性がある。 | ・急激な速度変化を伴う速度境界での、解析誤差が大きい。 |

（基礎地盤コンサルタンツ(株)技術資料を一部修正）

プログラムでは、理論走時計算にアイコナル方程式の差分解法を、波線追跡には各要素での走時の最大傾斜法を利用している。プログラムの特徴を以下に挙げる。

- ①解析領域を四辺形メッシュに分割して解析するので複雑な地形でも解析できる。
- ②弾性波速度が徐々に変化する構造でも解析できる。
- ③部分的な速度逆転層が解析できる。
- ④境界部で急激に速度が変化する構造では誤差が大きくなる。

インバージョン解析の際の初期速度区分モデルは、既往解析結果をそのまま用いず、萩原の方法により再作成した。初期速度区分モデルの作成においては、インバージョン解析に対して初期モデルの影響がどの程度出るかを把握するために、萩原の方法によって速度区分図（速度区分モデル）は低速度帯があるモデルとないモデルの2種類作成した。この2種類のモデルに対し最適な解析結果を得るために、パス計算による観測走時と解析走時のフィッティング状況を確認しつつ、試行錯誤し、20～30回程度の萩原の方法による解析を行った。再解析に使用する初動データとしては、既存資料のデータの初動走時は読み直しを行わず、そのまま利用した。既存資料の初動走時読み値に関しては、現地で取得されたオシログラフの記録紙によって確認し、読み取りは順当になされていたと判断される。

再解析に使用した屈折法データの諸元を表2. 2-2に示す。

表2. 2-2 再解析に使用する屈折法データの諸元

| 項目 | 内容 | |
|------|--------------------|---------------|
| 測点間隔 | 10m ピッチ（遠隔発破点なし） | |
| 測線延長 | 総延長 1700m 分（全区間直線） | |
| 起振源 | 70～160m 間隔 17点 | |
| その他 | 初動の読み | 一覧表に整理 |
| | 地形データ | 10m ピッチの数値データ |

解析では、層構造と仮定して萩原の方法により初期速度区分図を作成し、理論走時の計算、反復計算によってトモグラフィ解析図を作成した。初期モデルの解析結果に与える影響を検討するため、5km/s の均一初期速度モデルによる解析も行った。

解析の流れ図を図2. 2-1に示す。解析では、受振点間隔や波線密度、地形等を考慮し、解析メッシュ数が解析波線数の1.3倍程度となる20m間隔の解析用メッシュを使用した。解析時の入力条件を表2. 2-3に示す。逆解析方法としては、SIRT（同時反復法）を使用している。速度分布図の出力にあたっては、解析結果としての速度値が各解析メッシュ点に割り当てられるので、速度区分境界値は任意に設定することができる。

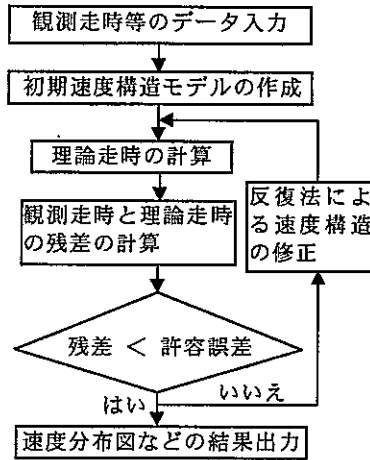


図 2. 2 - 1 解析の流れ図

表 2. 2 - 3 解析波線数及びメッシュ数

| 測線長 (m) | 発破点数 | 受振点数 | 解析波線数 | 解析メッシュ数 (タテ×ヨコ) |
|---------|------|------|-------|-----------------|
| 1700 | 20 | 171 | 1470 | 1892 (22×86) |

2. 2. 2. 解析結果

インバージョン解析の初期モデルとして使用する萩原の方法による解析結果の選定にあたっては、萩原の方法による低速度帯のある結果とない結果のそれぞれについて、観測走時と解析走時とのフィッティングが良いものを試行錯誤し決定した。そのための萩原の方法による解析パターンは、低速度帯のあるもの、ないもののそれぞれについて10パターン程度であった。最終的にインバージョン解析の初期モデルとして使用した萩原の方法による解析結果を図 2. 2 - 2 ~ - 3 に、その特徴を表 2. 2 - 4 に示す。図中の速度区分（凡例の速度境界値）については、岩級区分と弾性波速度との対比によく使用される境界値（D・CL：1.5km/s 以下、CM：1.5~3.0km/s、CH・B：3.0km/s 以上等）を設定した。従来の萩原の方法による解析では、観測走時の走時曲線に低速度部が認められる測線上の距離程 500~600m 付近に、低速度帯を作成する方が妥当と考えられる。

表2. 2-4 初期モデルとして使用した萩原の方法による解析結果の特徴

| モデル名 | 速度構造の特徴 |
|----------|--|
| 低速度帯有モデル | 表層には欠落している部分もあるが 10m 程度の層厚で 0.5km/s の土岐砂礫層と考えられる速度層が認められる。中間層には 1.5~2.8km/s の速度層が層厚 100~150m 程度分布している。中間層の距離程 800m 程度より始点側では 1.5km/s の速度層が優勢であり、距離程 800~1200m 付近では 2.8km/s の速度層が優勢である。この中間層は、土岐砂礫層下部~瑞浪層群~土岐花崗岩風化部を示していると考えられる。基盤は 4.6~4.8km/s を示しており、土岐花崗岩と対比できる。基盤の低速度帯は、距離程 520~580m に速度値 2.2km/s で認められる。 |
| 低速度帯無モデル | 表層には欠落している部分もあるが 10m 程度の層厚で 0.5km/s の土岐砂礫層と考えられる速度層が認められる。中間層には 1.6~2.5km/s の速度層が層厚 100~150m 程度分布している。中間層の距離程 200~500m 付近では 1.6km/s の速度層が優勢であり、距離程 500m 程度より終点側では 2.8km/s の速度層が優勢である。この中間層は、土岐砂礫層下部~瑞浪層群~土岐花崗岩風化部を示していると考えられる。基盤は 4.5~4.9km/s を示しており、土岐花崗岩と対比できる。 |

(1) 低速度帯のある場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとした解析結果 (図2. 2-4~5 参照)

図2. 2-4 の中段に示したインバージョン法による結果をみると、全体に中間層の速度値は、上段の萩原の方法による初期モデルと比較すると高くなっている。初期モデルで距離程 520~580m 区間に設定した低速度帯構造は、標高 200m 程度以下でそのまま保持されており、低速度帯周辺の基盤速度も低下している。特に、図2. 2-4 の下段の波線図を見ると、全体に深度 150m 程度以深では波線が通っておらず、解析結果の信頼性は低い。よって、この場合の探査深度は 150m 程度である。また、距離程 500m 付近の谷部から基盤の低速度帯に向かっての中間層では、測線の終点 (南側) に傾斜した低速度域が認められる。この低速度域は月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。

(2) 低速度帯のない場合の萩原の方法による結果を初期モデルとした解析結果 (図2. 2-6~7 参照)

図2. 2-6 の中段に示したインバージョン法による結果をみると、中間層の速度値は初期モデルと比較すると全体に高くなっている。基盤速度は、距離程 500m 以降で、初期モデルと比較すると増大している。また、顕著ではないが、距離程 600m 付近で基盤速度がやや低下している。ここでも、距離程 500m 付近の谷部から基盤の距離程 500~600m 付近に向かって、測線の終点 (南側) に傾斜した低速度域が認められる。この低速度域も月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。

(3) 5km/s 均一速度を初期モデルとした解析結果 (図 2. 2-8 ~ -9 参照)

全体の速度構造は、(2) の低速度帯の無い初期モデル結果と近似しているが、速度基盤がやや深く解析されている。ここでも、(1) や (2) と同様に、距離程 500m 付近の谷部から基盤の距離程 500~600m 付近に向かって、測線の終点 (南側) に傾斜した低速度域の落ち込みが認められる。この低速度域も月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。

(4) まとめ

以上の結果をまとめると以下のことが言える。

- ① (1) の低速度帯のある場合の初期モデルからの解析結果では、標高 200m 以深で解析時に波線が通過せず、初期モデルで設定した速度構造が保持されている。
- ② 速度基盤の距離程 500m 程度から起点側と 1300m 程度から終点側では、やや高速度となっており、5.0km/s 以上の領域が認められる。
- ③ (1) から (3) のどの解析結果でも、距離程 500m 付近の谷部から基盤の距離程 500~600m 付近に向かって、測線の終点 (南側) に傾斜した低速度域が認められる。この低速度域は月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。
- ④ 既存資料のデータによる解析では、表 2. 2-2 に示した解析波線数 (1470) と解析メッシュ数 (1892) との関係や、図 2. 2-4、-6、-8 の下段に示した波線密度を考慮すると、解析メッシュを 20m 間隔より小さく設定することは、解析結果の信頼性を低下させると判断できる。解析メッシュを細分化し、解析精度を向上させるためには、さらなる測定データが必要である。
- ⑤ 初期モデルに用いた萩原の方法による解析結果については、月吉断層と想定される距離程 500~600m 付近に低速度帯のある結果と、ない結果の 2 種類を使用した。通常の方法では、走時曲線の形状からこの付近に低速度帯を設定されやすいと推測されるが、距離程 500m 付近には谷地形も認められ、走時曲線の形状は地形の影響を受けている可能性もある。インバージョン解析をより客観的に行うためには、低速度帯のない初期モデルを使用する方が良いときもあり得ると考えられる。

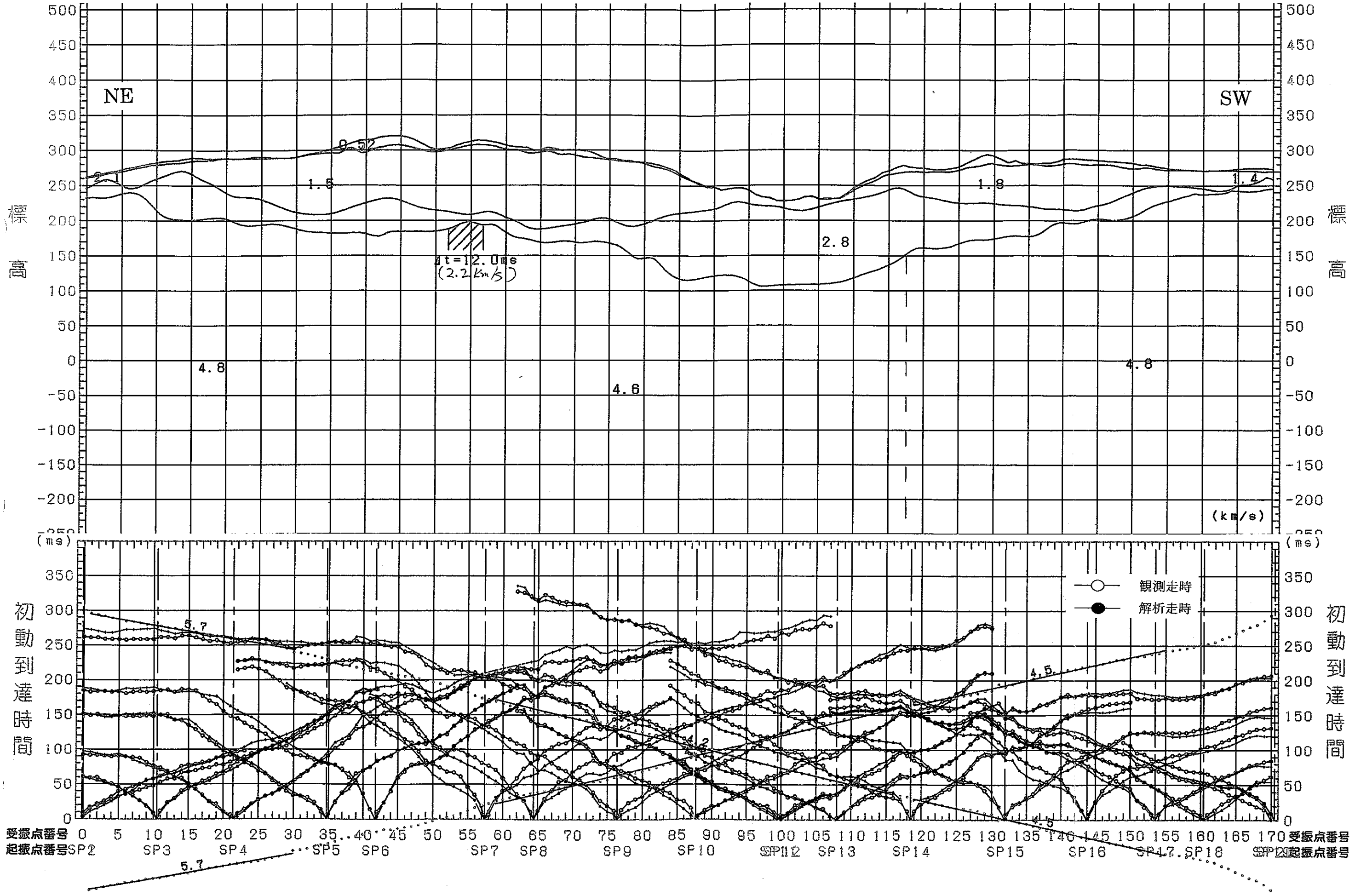


図 2.2-2 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果

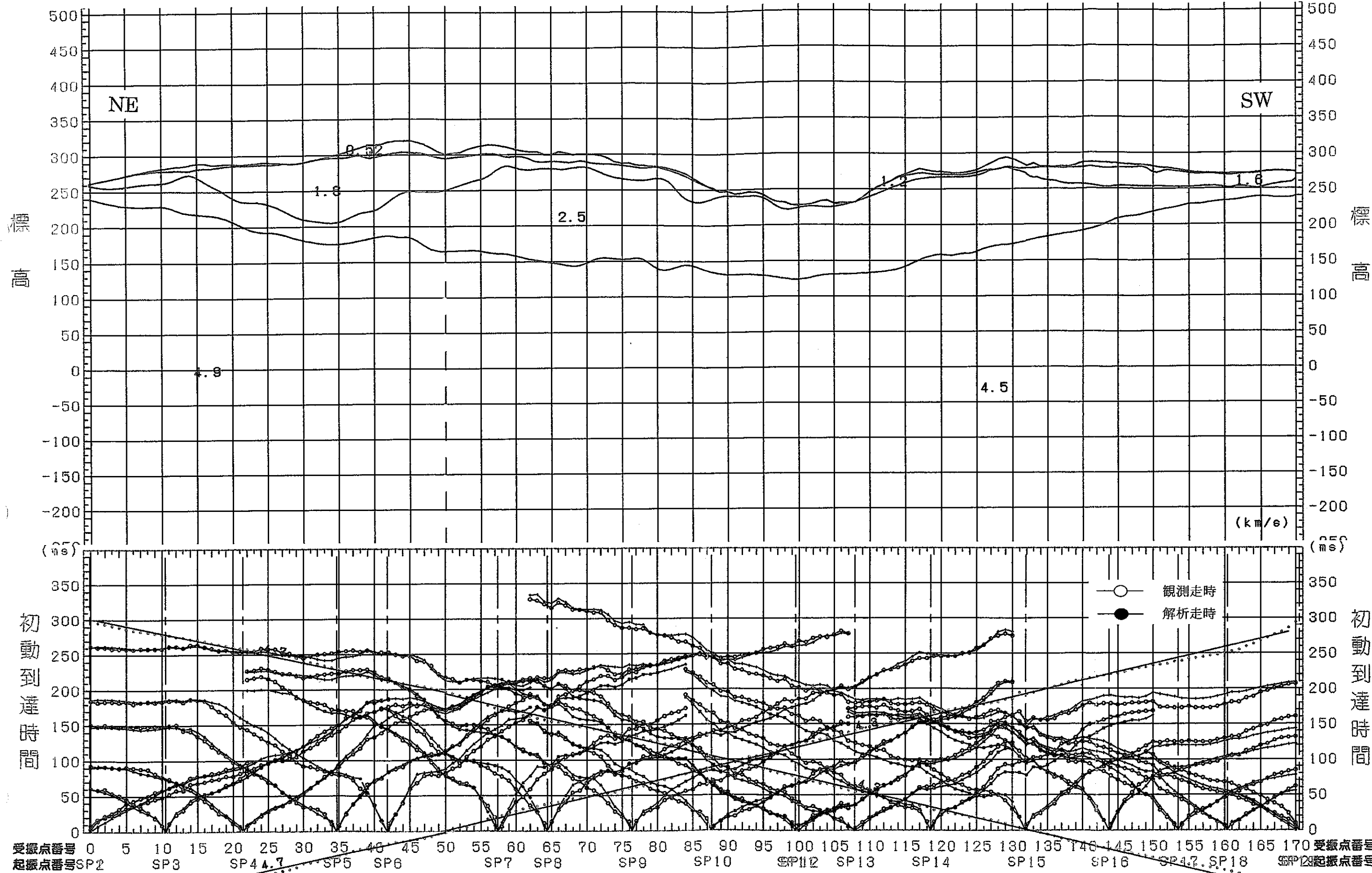


図 2.2-3 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果

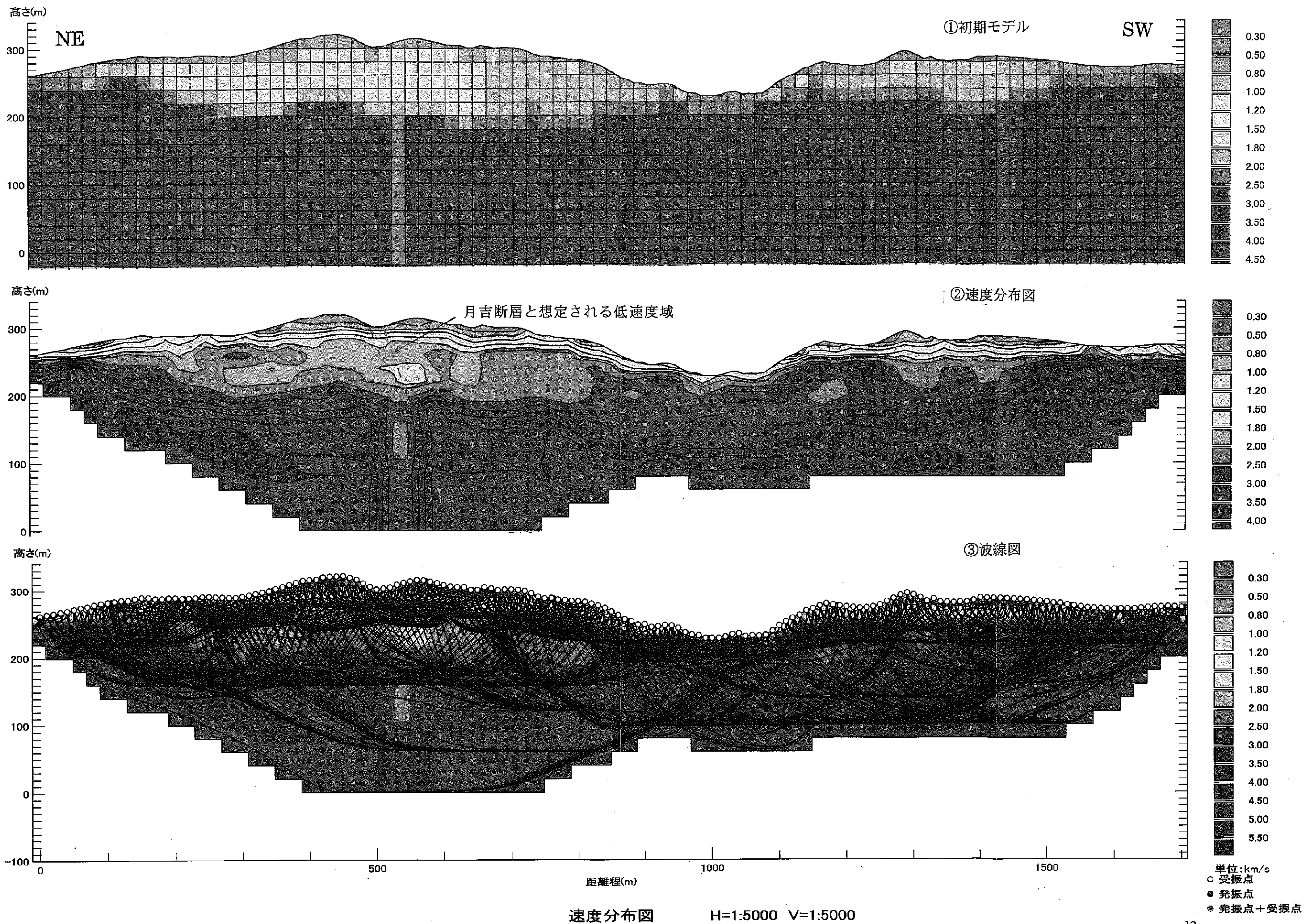


図 2.2-4 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図)

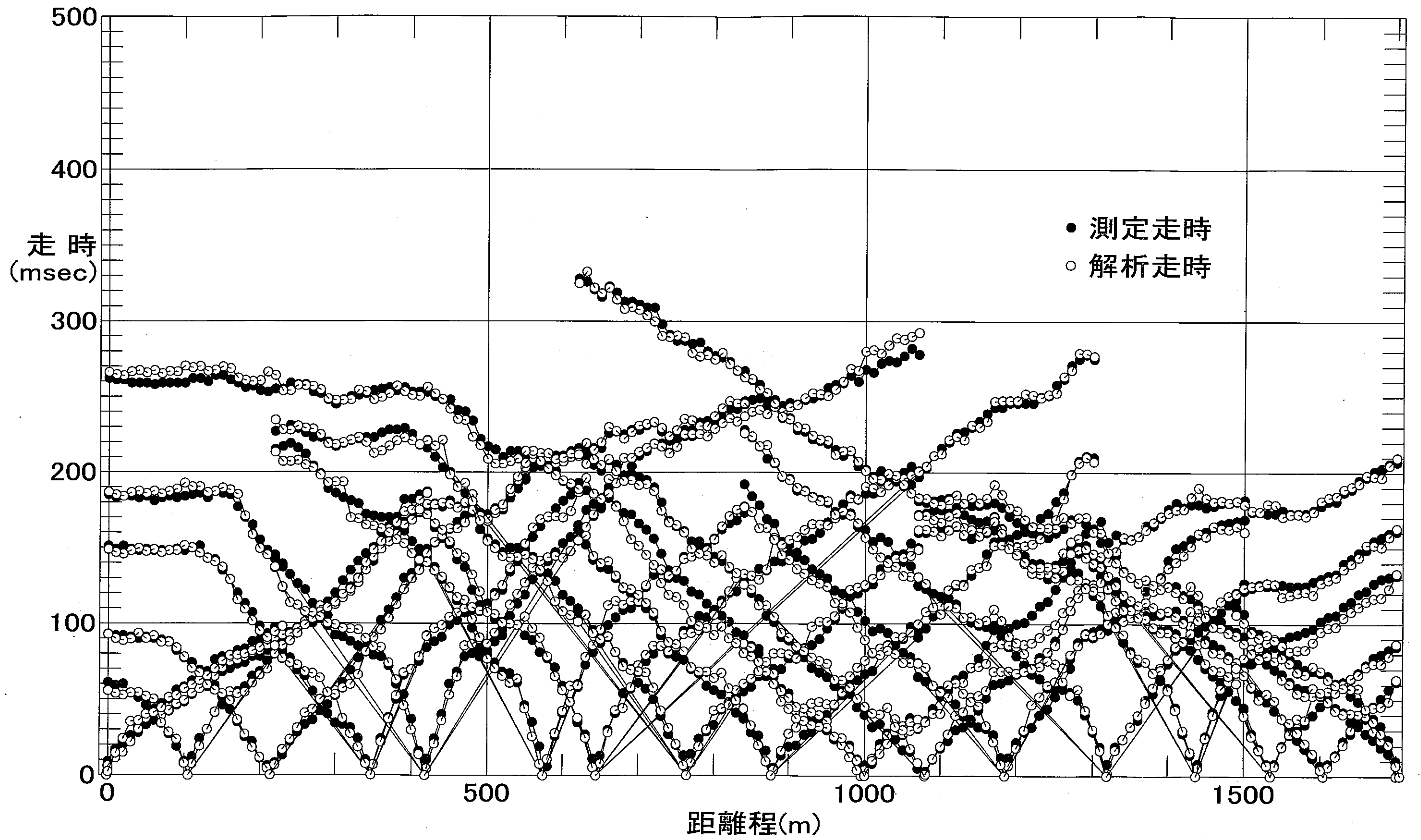


図 2.2-5 低速度帯がある場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図)

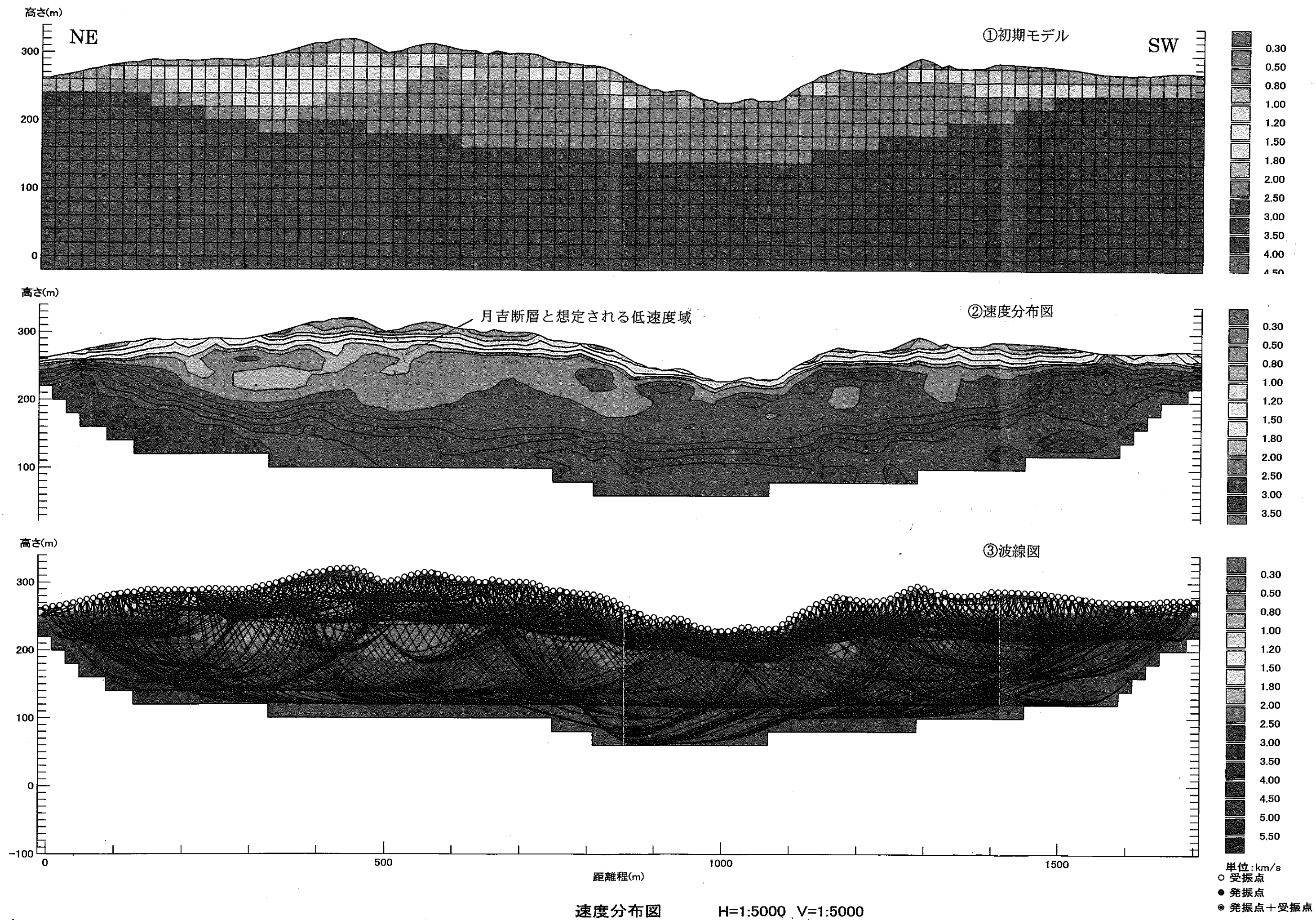


図 2.2-6 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図)

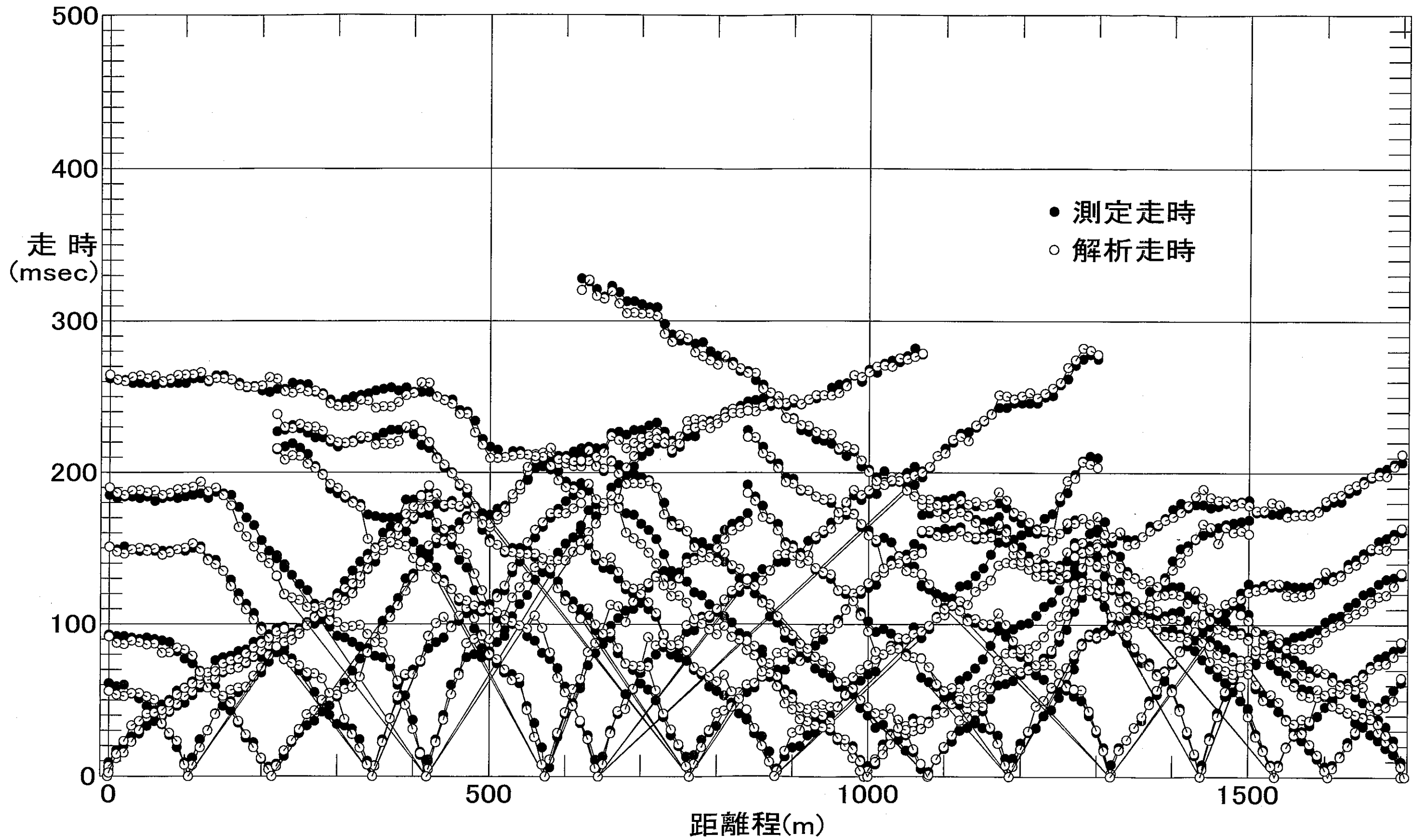


図 2.2-7 低速度帯がない場合の萩原の方法による解析結果を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図)

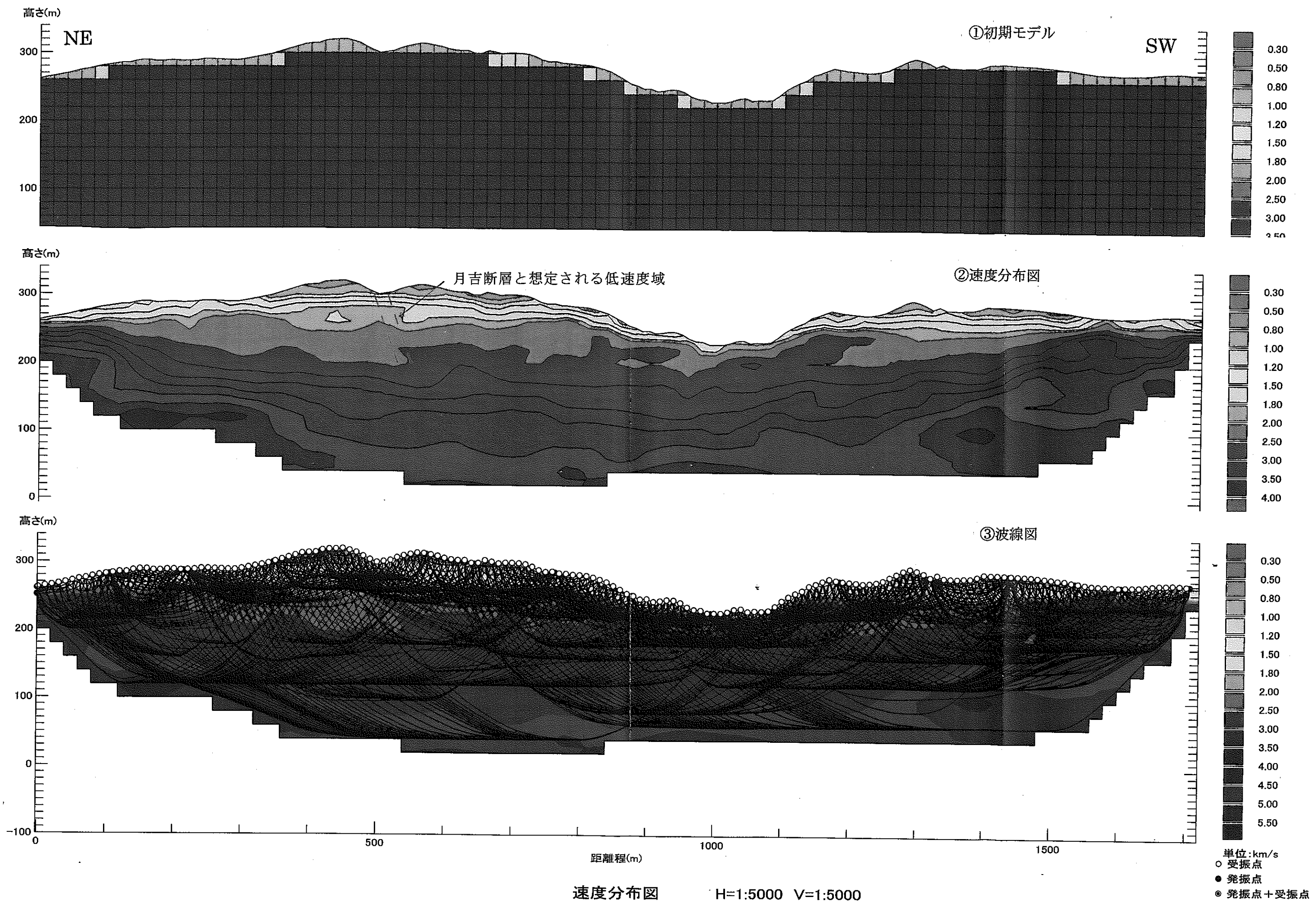


図 2.2-8 5km/s 均一速度層を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(1)(速度分布図)

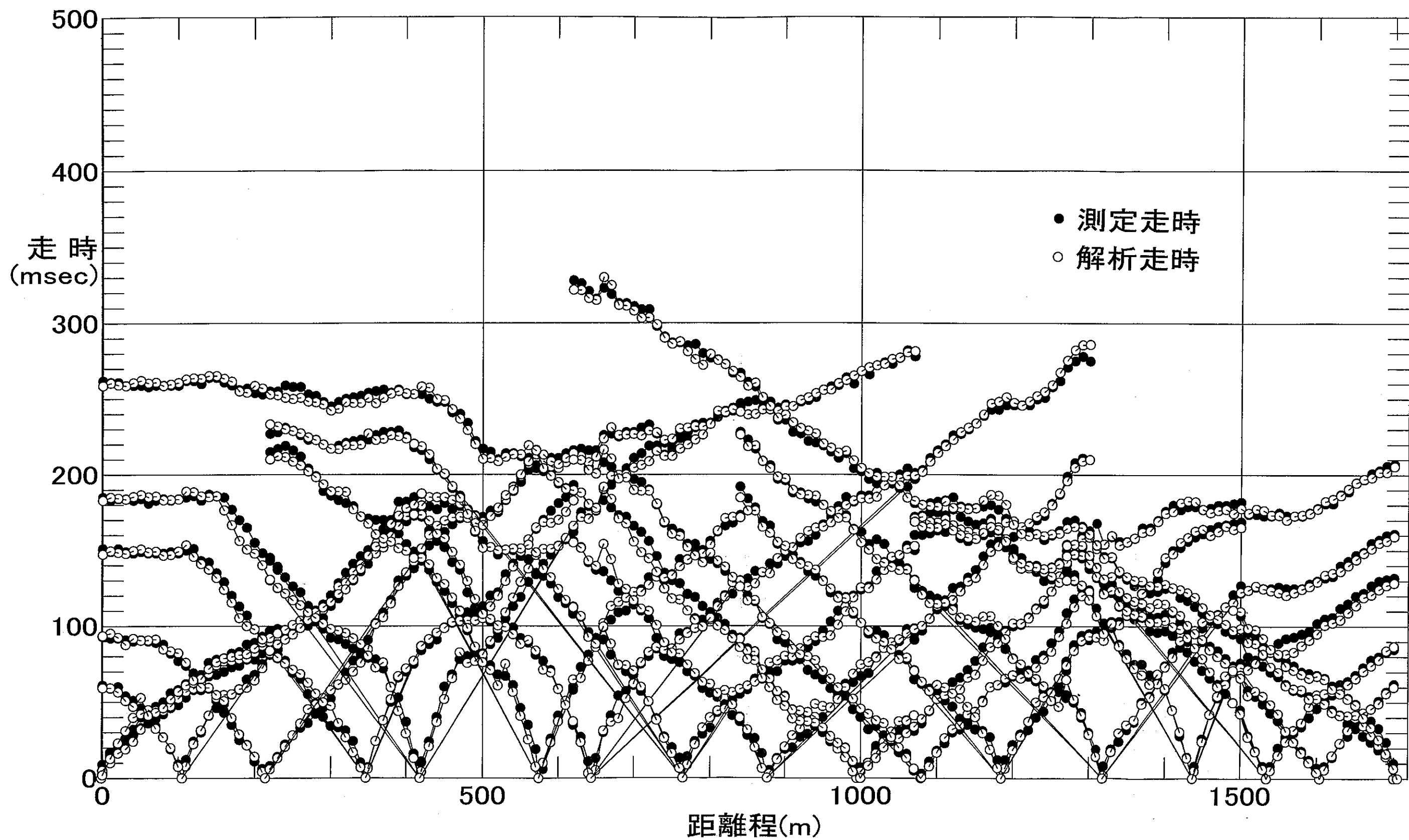


図 2.2-9 5km/s 均一速度層を初期モデルとしたインバージョン法解析結果(2)(走時曲線図)

2. 3. 統計的速度区分の試行

2. 3. 1. 試行方法

2. 2. におけるインバージョン解析の際の初期速度区分モデルとしての速度区分図の作成は、統計的な速度区分を試行するため、萩原の方法により作成した。使用した解析結果は、低速度帯のある場合と低速度帯のない場合の2種類である

ここでは、走時データの品質を確認するため、各初動データのプロット（走時曲線）から求められる速度走時と、実際に最小自乗法によって選択した速度走時線（ハギトリ線）の傾きの関係を、その偏差等について統計的根拠に基づく整理を試みた。

速度走時線の折れ点は、表 2. 3 - 1 に示すように、低速度帯のある場合で距離程 300~590m 間と 1160~1190m 間の 2 箇所であり、低速度帯のない場合で距離程 500m の 1 箇所であった。この折れ点の位置については、2. 2. で記述したように低速度帯のある場合およびない場合のそれぞれについて、10パターン程度の萩原の方法による試行錯誤の末に得られたものである。

統計的指標としては、逆解析の収束性の判断に用いられる RMS（平均二乗残差）を用いた。逆解析では、残差の二乗和を小さくするように計算されるので、逆解析の収束性の判断には、RMS が良く利用されている。平均二乗残差については、以下の算出式を用いた。

$$\text{平均二乗残差 (ms)} : \sqrt{((\sum (X_{\text{cal}} - X_{\text{obs}})^2) / N)}$$

$$\text{平均二乗残差 (\%)} : (\sqrt{((\sum ((X_{\text{cal}} - X_{\text{obs}}) / X_{\text{obs}})^2) / N)}) \times 100$$

ただし、 X_{cal} : 解析走時(ms)、 X_{obs} : 観測走時(ms)、 N : 走時データ数、を示す。

2. 3. 2. 試行結果

萩原の方法による解析結果については、図 2. 2 - 2（低速度帯のある場合）と図 2. 2 - 4（低速度帯のない場合）に前述しているが、基盤の速度区分の基準となる解析に利用した基盤の速度走時線（ハギトリ線）を図 2. 3 - 1 に改めて示す。

2. 2. で初期モデルとして使用した萩原の方法による解析結果での、それぞれの基盤の速度値の基となった各基盤速度区間の速度走時より求めた回帰直線区間での平均二乗残差を表 2. 3 - 1 に示す。平均二乗残差は、低速度帯のあるモデルで 2.1ms (4.7%) 程度以内であり、低速度帯のない場合で 2.5ms (11%) 程度以内であった。この結果からは、低速度帯のある場合の方がやや誤差が小さく、結果として妥当なように見えるが、速度走時線を求めた区間が低速度帯のない場合に比べて短いことを考慮すると、一概にそうとも言えない。区間が短いほど定性的に、それぞれの区間で残差が小さくなるようにハギトリ線の傾きを変えることができるからである。

以上のように萩原の方法では、測定で得られた観測走時から速度走時を算出することは客観的にできるが、低速度帯の設定や水平方向の速度境界の決定には解析者の主観による差異が生じやすい特性があると言える。

表 2. 3 - 1 速度走時より求めた各回帰直線区間での平均二乗残差

| 低速度帯の有無 | 低速度帯のある場合 | | | 低速度帯のない場合 | |
|------------|-----------|--------|----------|-----------|--------|
| | 距離程区間(m) | 10~300 | 590~1160 | 1190~1550 | 10~500 |
| 平均二乗残差(ms) | 1.16 | 2.08 | 1.67 | 2.52 | 2.48 |
| 平均二乗残差(%) | 4.73 | 1.27 | 0.55 | 11.23 | 1.36 |

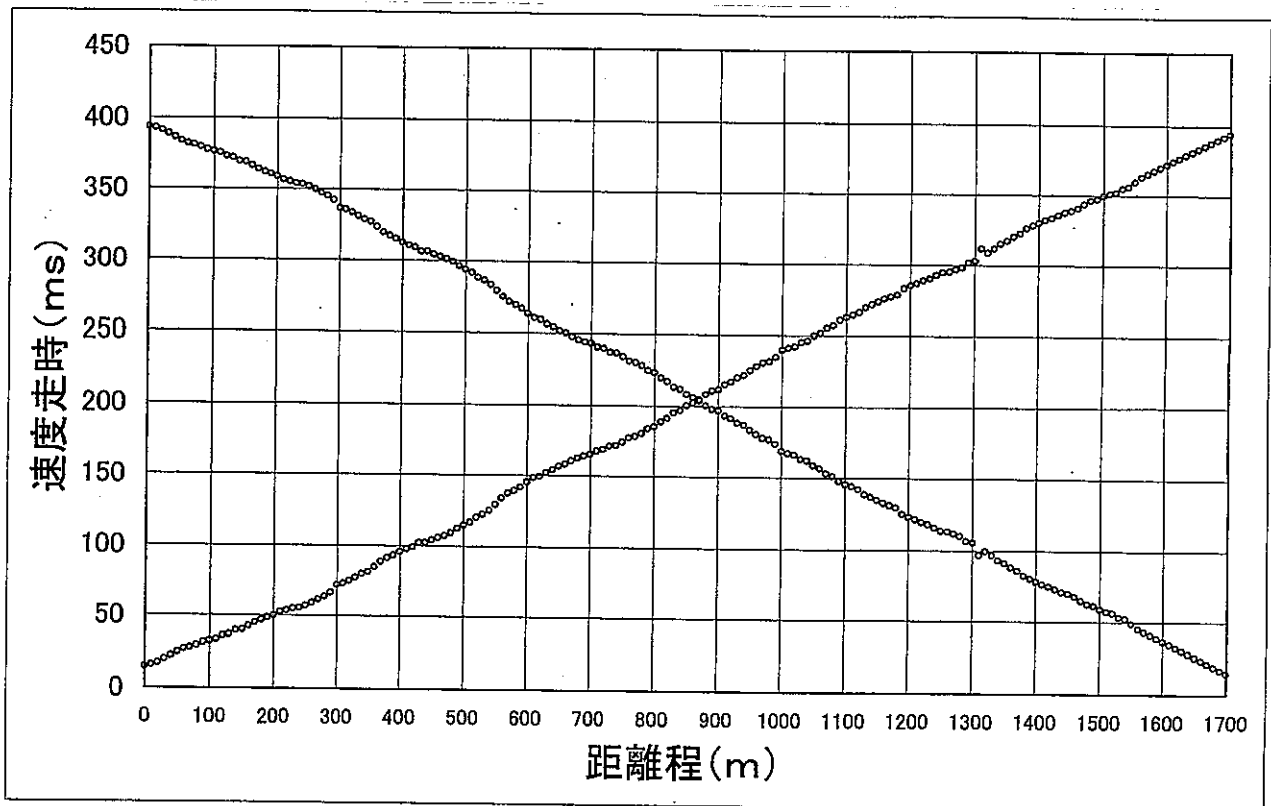


図 2.3-1 基盤の速度走時線（はぎとり線）図

2. 4. 屈折法による速度区分の品質整理

2. 4. 1. 整理方法

ここでは、萩原の方法による速度層区分の拠所となる速度走時の傾き（速度）や速度層境界の位置を、どの程度品質保証することが可能であるか提示するため、2. 2. の初期速度モデルとした萩原の方法による解析結果について、観測走時と理論走時の偏差を統計的根拠に基づいて整理した。また、インバージョン結果についても統計的根拠に基づいて整理し、萩原の方法による解析結果とインバージョン法による解析結果の両者の品質について比較した。

統計的根拠としては、2. 3. と同様に、RMS を用いた。

図 2. 4-3、-5、-7 の内、RMS 値の変化は、最大二乗残差と平均二乗残差の変化を示し、相対誤差の変化は、観測走時に対する解析走時の平均相対誤差を示している。図中のエラーバーは 1σ の範囲である。相対誤差がプラス（+）側からゼロ（0）へ収束する場合は、初期モデルが予想される真値よりも低速度（走時が大）であることを示しており、マイナス（-）側からゼロ（0）へ収束する場合は、初期モデルが真値よりも高速度（走時が小）であることを示している。

図 2. 4-4、-6、-8 の解析結果の誤差分布の内、測定値と解析値の相関は、観測走時と解析走時の相関を示しており、解析誤差の分布は、 $\pm 10\%$ ほどの誤差を頻度分布として、ヒストグラム化したものである。

2. 4. 2. 整理結果

(1) 萩原の方法での整理結果

低速度帯のある場合の萩原の方法による結果での観測走時と解析走時の比較図を図 2. 4-1 に、低速度帯のない場合の比較図を図 2. 4-2 に示す。

両図を比較すると、図 2. 4-2 の低速度帯のない場合の平均二乗残差は 11.45% (6.93ms) と、図 2. 4-1 の低速度帯のある場合の 11.97% (7.50ms) よりも、やや平均二乗残差が小さい。図 2. 4-2 では、特に基盤の走時を示す絶対値の大きい走時でのプロットが、直線状に分布しており、そのため平均二乗残差が小さくなったと判断される。

(2) インバージョン法での整理結果

2. 2. の各インバージョン結果における繰り返し計算時の収束状況や、解析結果の誤差分布を図 2. 4-3 ~ -8 に示す。

図 2. 4-3、-5、-7 でそれぞれの収束状況を比較すると、基本的に平均二乗残差は単純減少しており、収束性は良い。解析終了時の繰り返し計算 10 回目の

観測走時と解析走時の平均二乗残差は、低速度帯のある場合で 11.70% (6.23ms)、低速度帯のない場合で 11.54% (6.14ms)、均一初期モデル結果で 10.20% (4.62ms) であった。均一初期モデル結果の平均二乗残差がやや小さかった。

また、図 2. 4-4、-6、-8 で解析結果の誤差分布を比較すると、図 2. 4-4 の低速度帯のある場合の測定値と解析値の相関図にややばらつきが認められる。これは、初期モデルに低速度帯を入れた影響と考えられる。誤差の頻度分布では、どの場合でも、±10%以内に誤差が集中している。

(3) 両手法での整理結果の比較

今回の解析結果から両手法（萩原の方法とインバージョン方法）の品質保証に関して比較すると以下のことがいえる。

- ①萩原の方法でもパス計算を必ず行い、解析走時と観測走時を比較できるようにすれば、解析結果としても速度分布図を評価しやすいと考えられる。
- ②萩原の方法による解析結果の平均二乗残差と、萩原の方法による解析結果を初期モデルにした場合のインバージョン法による解析結果の平均二乗残差とを比較すると、双方とも 11~12%であり同等の結果が得られているが、速度分布を比較すると、図 2. 2-4 や図 2. 2-6 のインバージョン法の結果では地質の不均質さを表現していると考えられる速度構造の不均質状況が確認でき、真の速度構造に近いと推測される。以上の考察結果より、屈折法弾性波探査においては基本的にインバージョン法を用い、走時曲線で明らかな速度急変部が存在する場合には初期モデルに萩原の方法による結果を使用し、それ以外の場合には均一速度初期モデルを使用することが考えられる。このように初期モデルを選択することによって、解析結果としての速度分布の信頼性を一層向上させることができる。
- ③インバージョン解析結果で、萩原の方法による解析結果を初期モデルにした場合と、均一速度モデルを初期モデルとした場合とを比較すると、均一速度モデルからの結果の残差の方が小さくなった。この原因について、図 2. 2-5、-7、-9 の走時曲線や、図 2. 4-4、-6、-8 の測定値と解析値の相関での観測走時と解析走時のフィッティング状況から推測すると、均一速度モデルによる結果の方が走時 50~200ms 程度の誤差が小さく、中間層の速度構造が影響していると考えられる。具体的には、萩原の方法による解析結果を初期モデルとする場合、中間層の急激な速度境界付近の初期速度設定が、解析結果の誤差に影響することが考えられる。

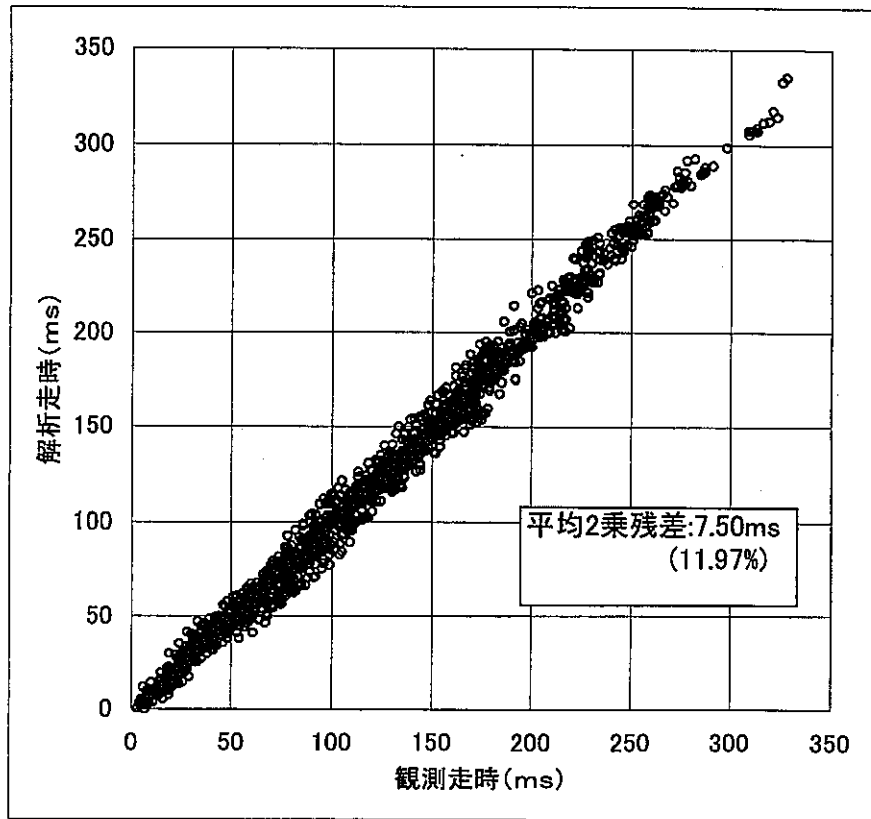


図 2.4-1 萩原の方法による観測走時と解析走時の比較図（低速度帯がある場合）

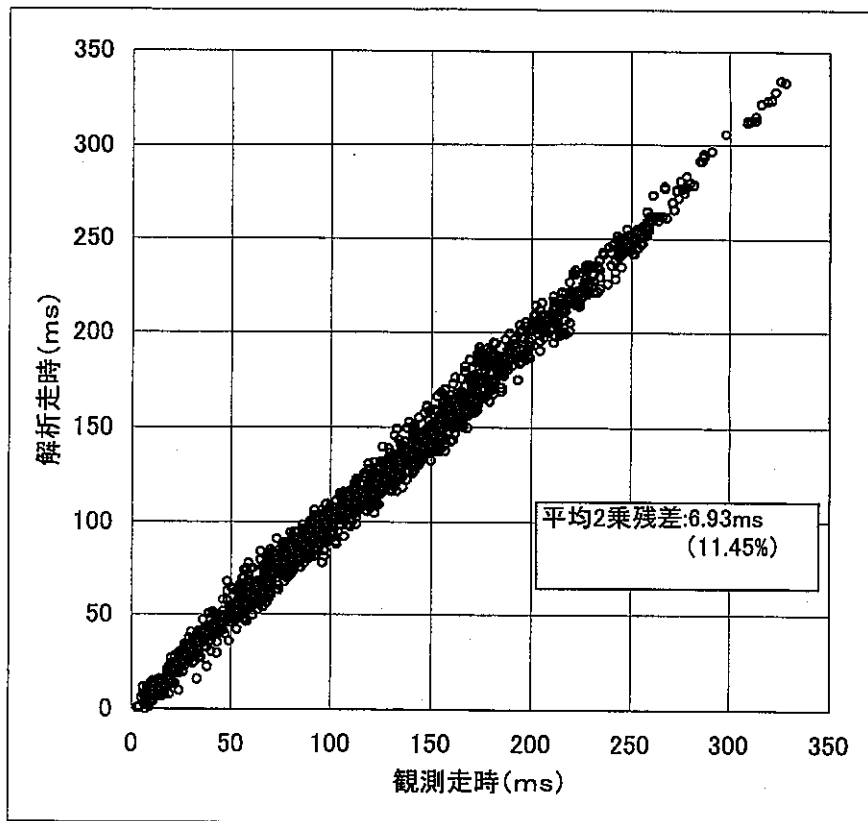
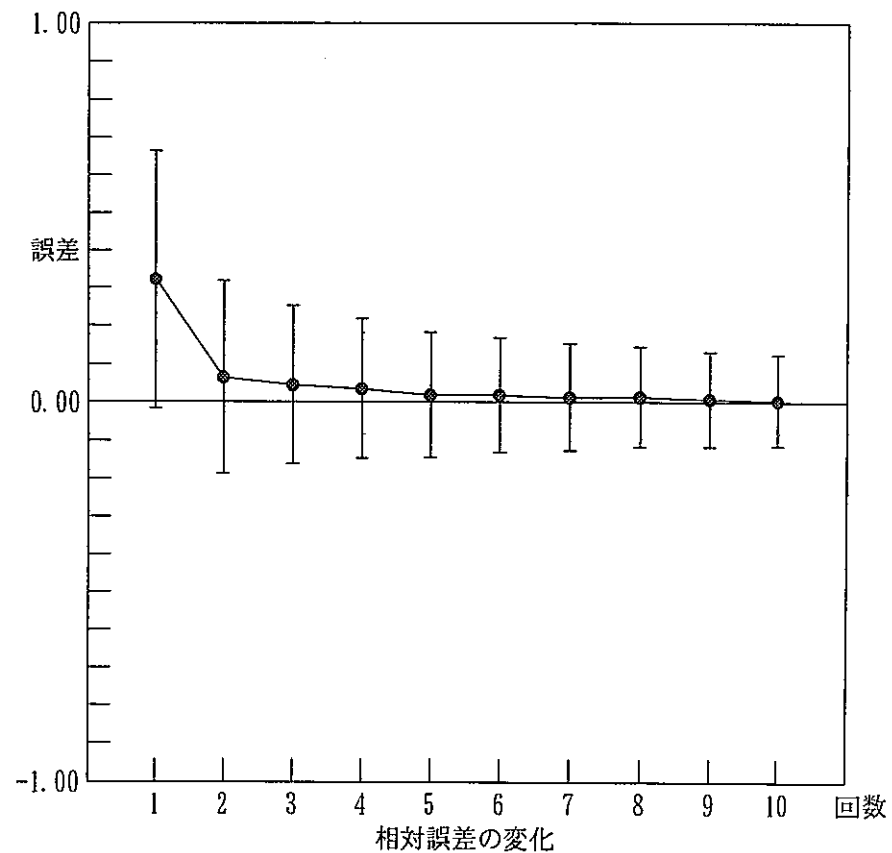
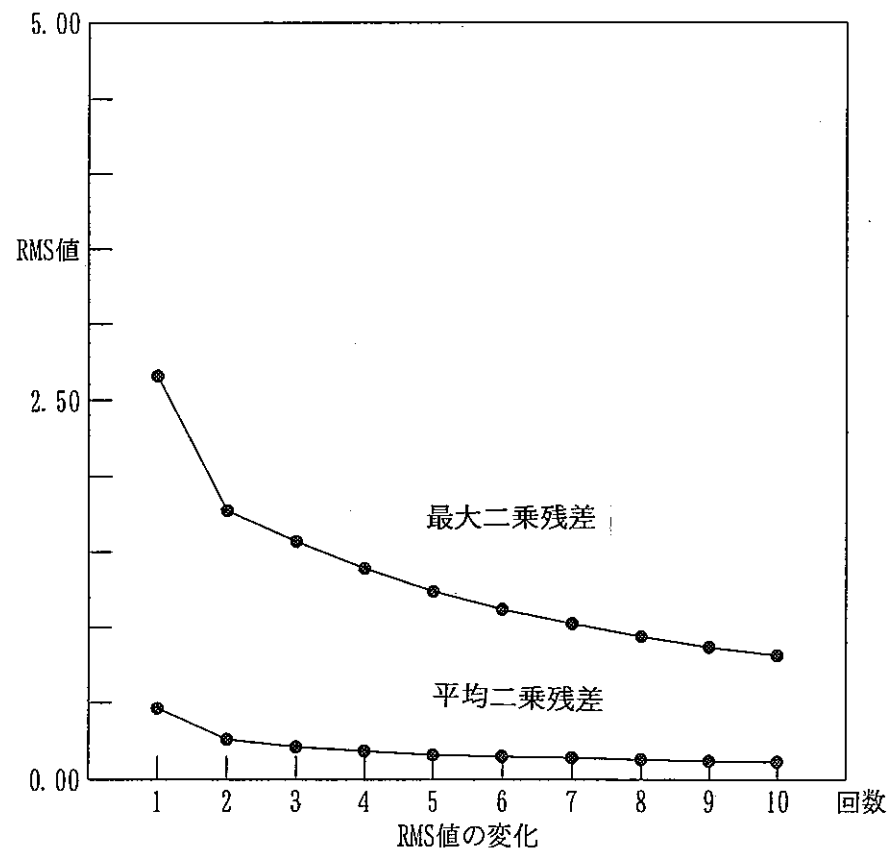
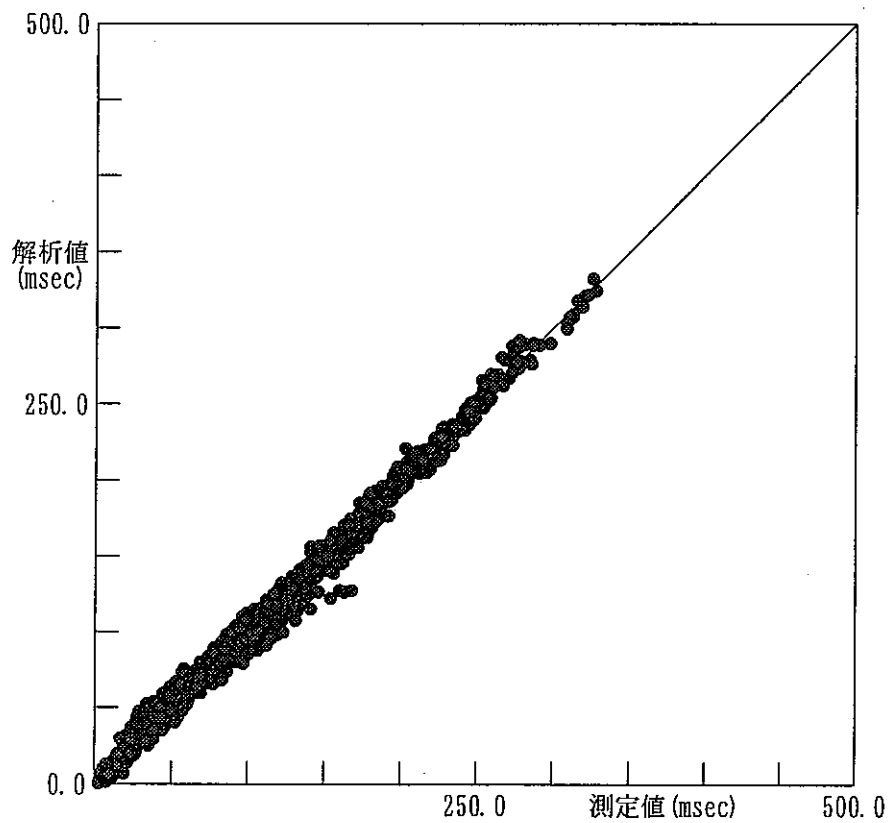


図 2.4-2 萩原の方法による観測走時と解析走時の比較図（低速度帯がない場合）

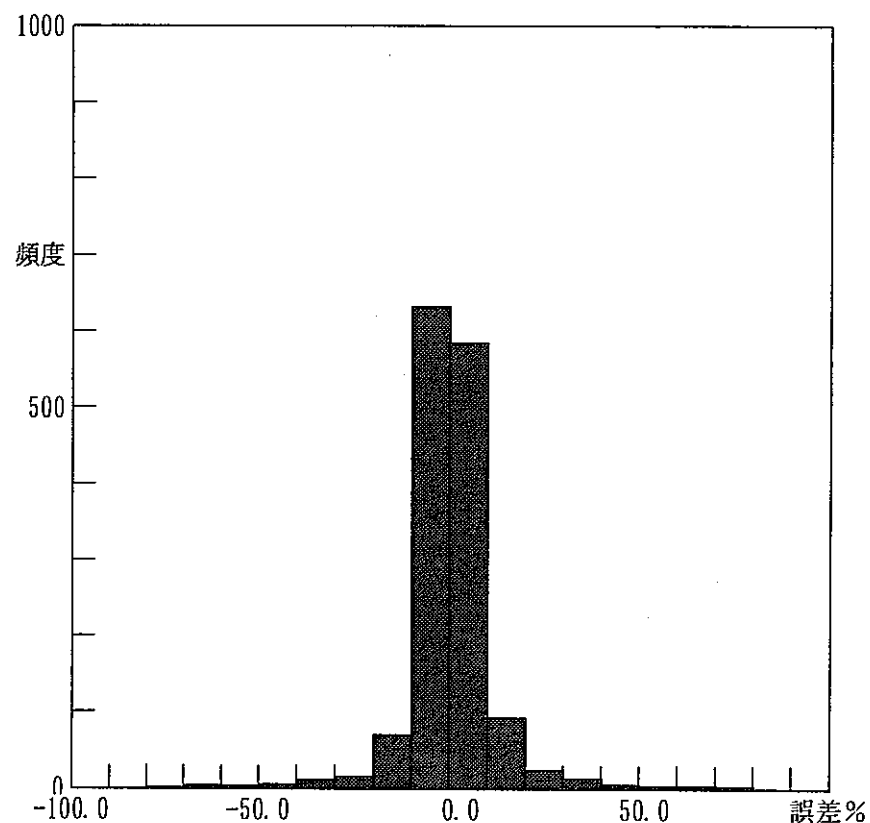


収束状況

図 2.4-3 低速度帯がある場合のインバージョン法解析結果(3) (収束状況)

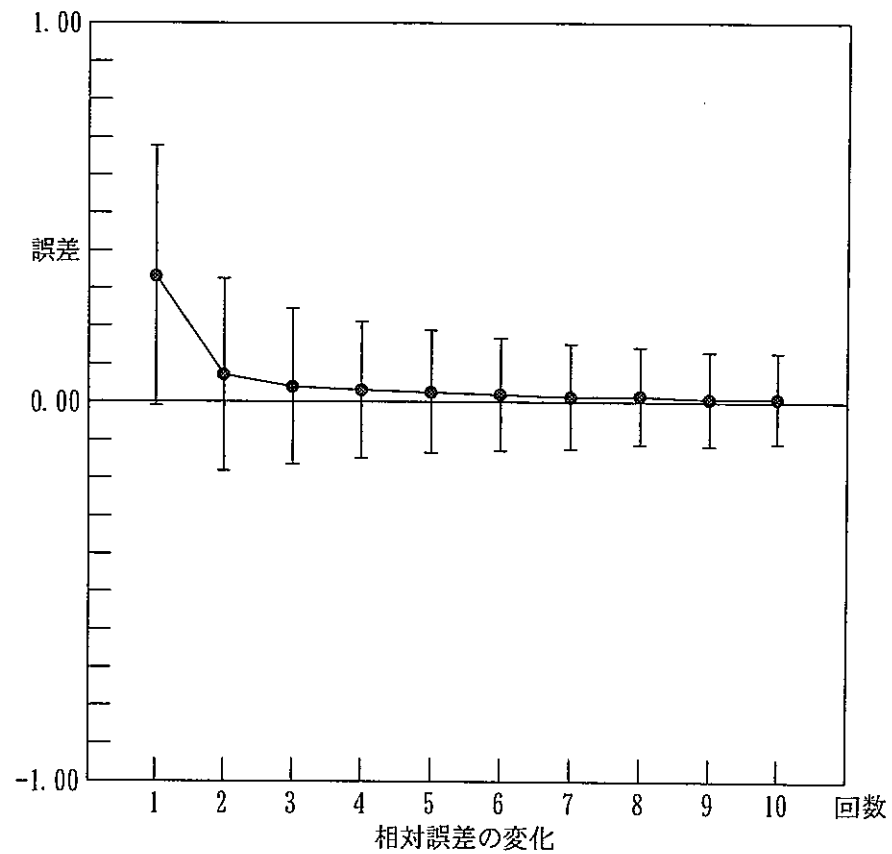
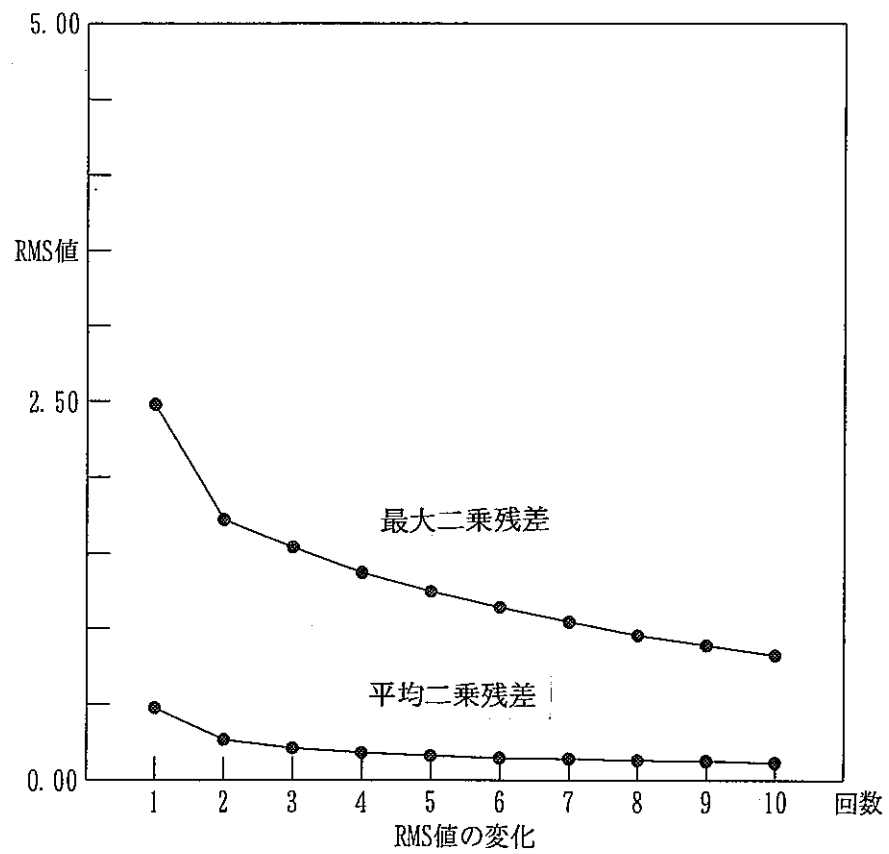


測定値と解析値の相関



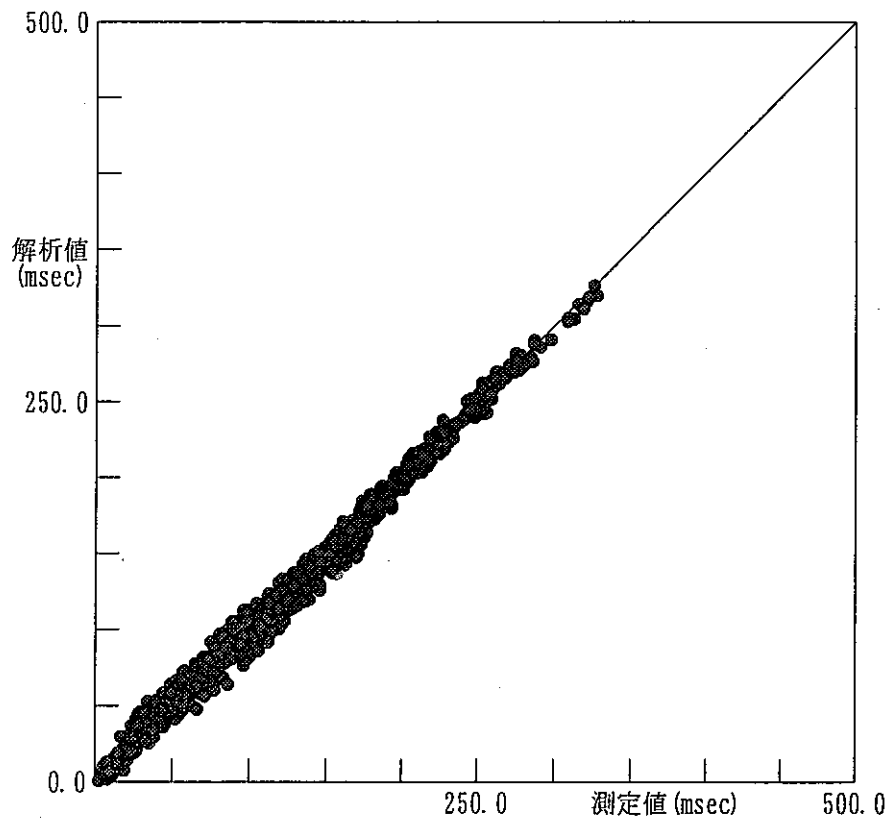
解析結果の誤差分布

図 2.4-4 低速度帯がある場合のインバージョン法解析結果(4) (誤差分布)

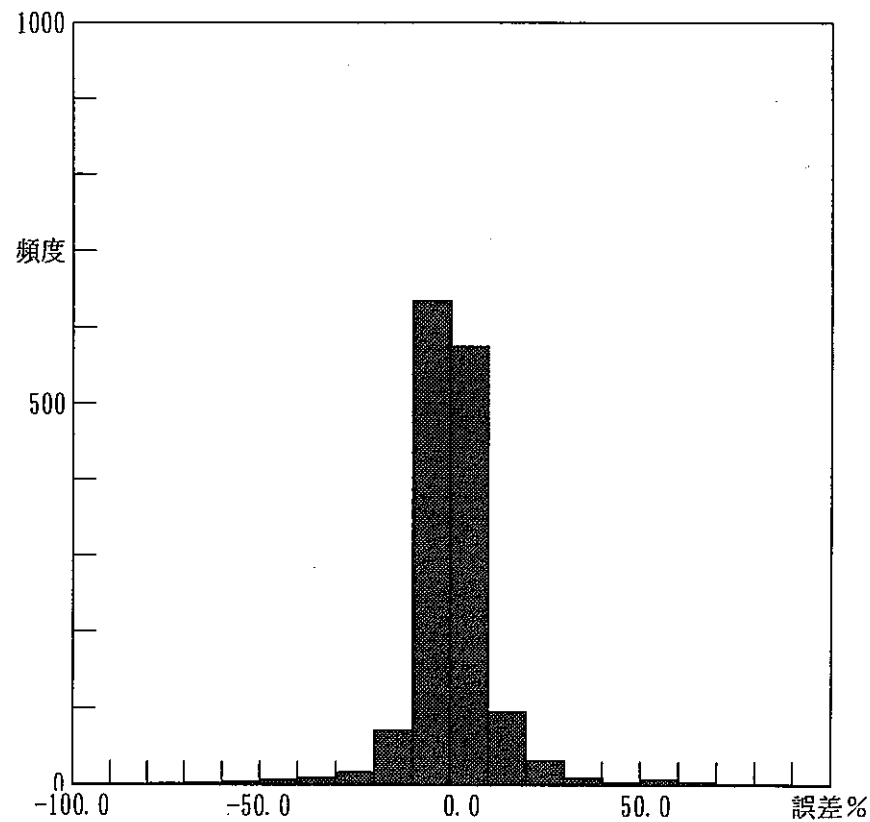


収束状況

図 2.4-5 低速度帯がない場合のインバージョン法解析結果(3) (収束状況)



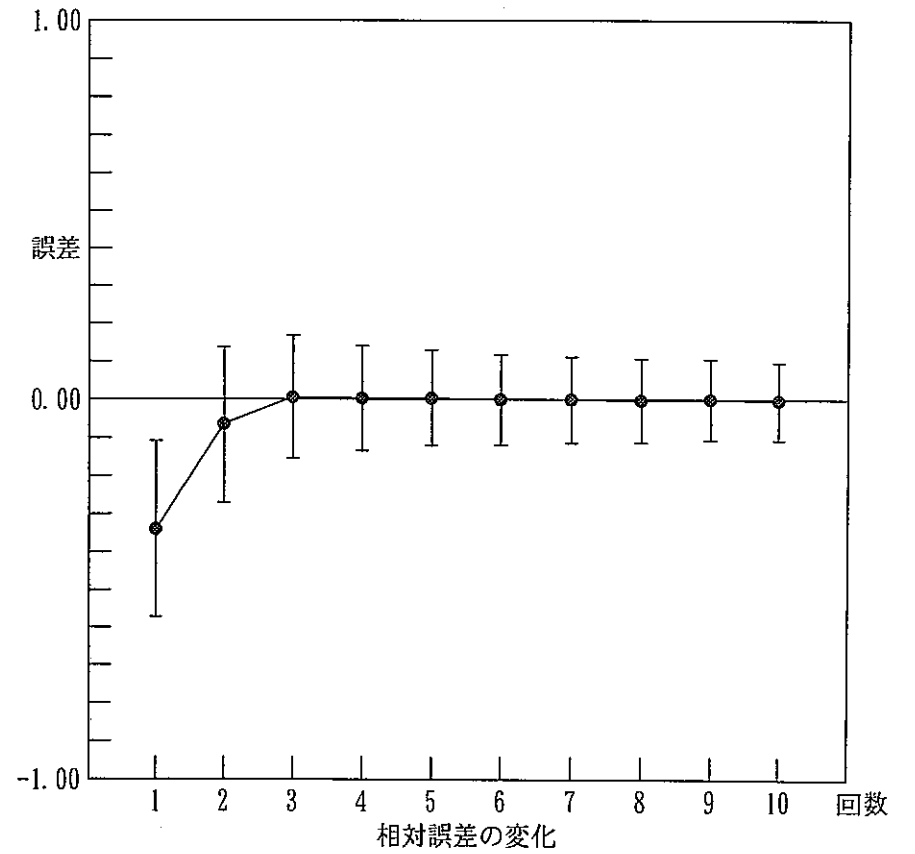
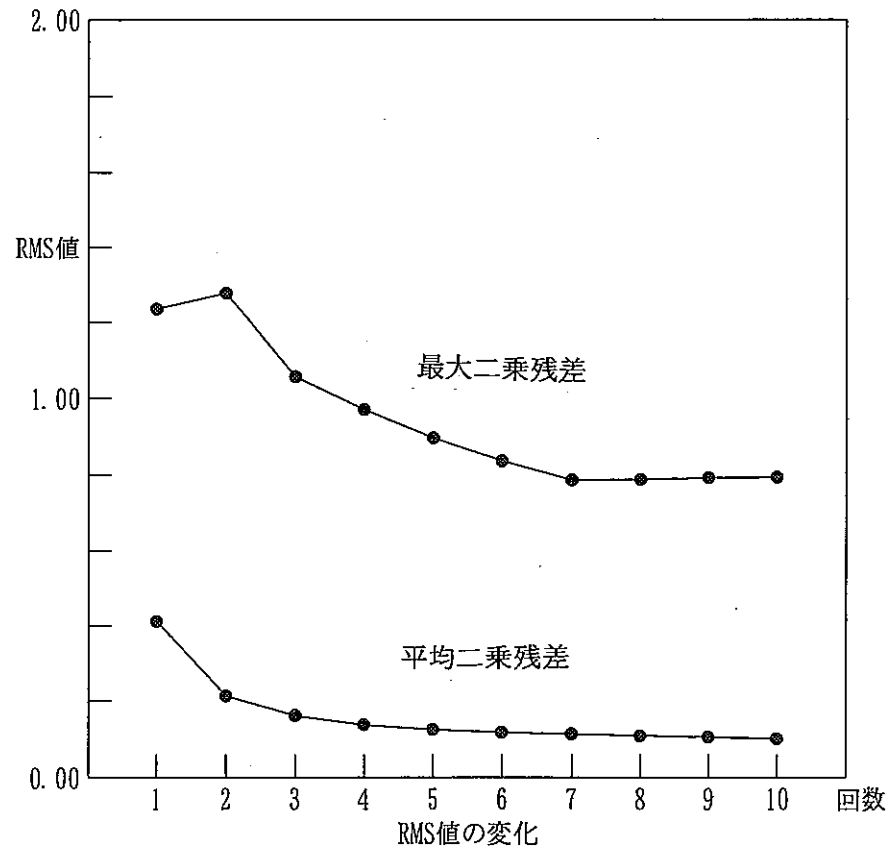
測定値と解析値の相関



解析誤差の分布

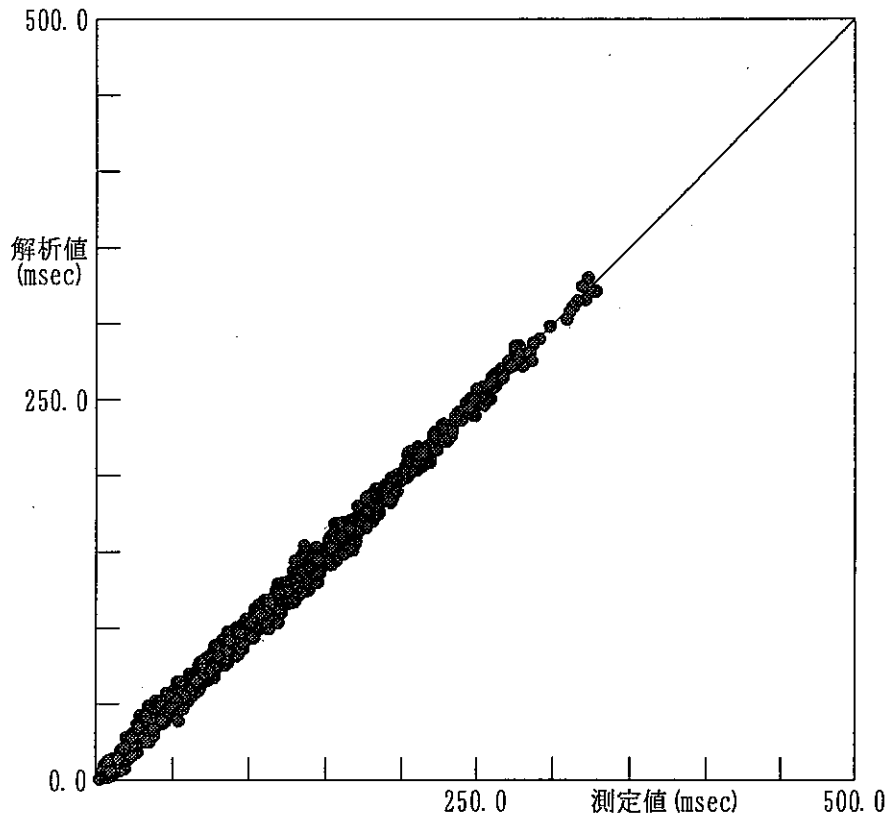
解析結果の誤差分布

図 2.4-6 低速度帯がない場合のインバージョン法解析結果(4) (誤差分布)

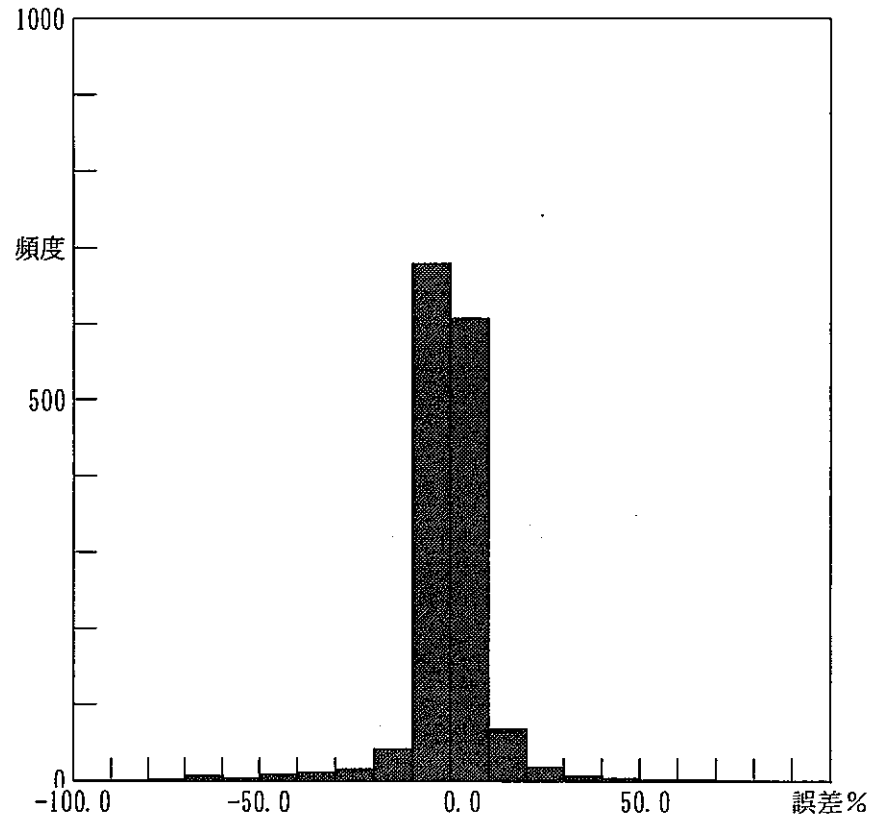


収束状況

図 2.4-7 均一速度モデルによるインバージョン法解析結果(3) (収束状況)



測定値と解析値の相関



解析誤差の分布

解析結果の誤差分布

図 2.4-8 均一速度モデルによるインバージョン法解析結果(4) (誤差分布)

2. 5. インバージョン技術を応用した感度解析

2. 5. 1. 解析方法

ここでは、インバージョン技術を応用して、月吉断層規模の断層の幅、角度、速度値をパラメータにして感度解析（モデル解析）を試みた。これらの結果から、どの程度の速度構造条件で、どのような探査計画であれば断層構造を把握しうるかを整理した。

解析用モデルの作成にあたっては、地形や固有の速度構造等の他の解析パラメータによる影響を除去し、他の地域の一般的断層調査の際にも適用できるように、断層および周辺地質を単純な平坦地形および速度モデルを採用した。具体的には、断層月吉既存資料や再解析時の萩原の方法によって得られた低速度帯のある初期速度モデルより、断層付近の速度構造をモデル化し、表2. 5-1に示す条件で、モデル解析を行った。仮定した起振点間隔は20m、受振点間隔は10mである。モデル解析に用いた各地層の層厚と速度値を表2. 5-2に、各ケースでの断層の幅、角度、速度値を表2. 5-3に示す。感度解析を行ったのは、月吉断層の幅で3ケース、断層の物性（速度値）で2ケース、角度で2ケースの計10ケースである。断層幅10mのケースについては、断層幅20mでの結果より基盤のみの断層モデルでは解析による断層の捕捉は困難であると思われたので、中間層にも断層を仮定した場合のみ解析した。

また、走時データ数の変化による感度の違いを確認するため、表2. 5-3のケース8について、起振点間隔を40、80、160mと変化させた解析も実施した。各起振点間隔での解析波線数は表2. 5-4の通りである。

解析は、①各断層速度構造モデルによる順計算（観測走時計算）、②断層のない水平多層モデルを初期速度構造モデルとした逆計算、③速度分布図等の解析結果の出力、の順で行った。

表2. 5-1 断層モデル解析時の解析条件

| 測線長(m) | 発破点数 | 受振点数 | 解析波線数 | メッシュ間隔(m) | 解析メッシュ数(タ×ヨ) |
|--------|------|------|-------|-----------|--------------|
| 500 | 26 | 51 | 1300 | 10 | 750(15×50) |

表2. 5-2 モデル解析に用いた各地層の層厚と速度値

| 項目 | 土岐砂礫層 | 瑞浪層群 | 土岐花崗岩 |
|-----------|-------|------|-------|
| 層厚(m) | 50 | 50 | -(基盤) |
| 速度値(km/s) | 1.0 | 2.0 | 4.0 |

表 2. 5 - 3 モデル解析に用いた断層の幅、角度、速度値

| ケース | 断層の幅(m) | 断層の傾き(°) | 断層の速度値(km/s) |
|-----|---------|----------|----------------|
| 1 | 40 | 90 | 基盤 2.0 |
| 2 | 40 | 45 | 基盤 2.0 |
| 3 | 40 | 90 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |
| 4 | 40 | 45 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |
| 5 | 20 | 90 | 基盤 2.0 |
| 6 | 20 | 45 | 基盤 2.0 |
| 7 | 20 | 90 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |
| 8 | 20 | 45 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |
| 9 | 10 | 90 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |
| 10 | 10 | 45 | 基盤 2.0、中間層 1.0 |

表 2. 5 - 4 各起振点間隔での解析波線数

| 起振点間隔(m) | 20 | 40 | 80 | 160 |
|----------|------|-----|-----|-----|
| 解析波線数 | 1300 | 650 | 350 | 200 |

2. 5. 2. 解析結果

各ケースにおける速度の検知状況は以下のとおりである。また、各パラメータ変化に対して得られた速度構造の特徴を表 2. 5 - 5 に示す。

(1) ケース 1 (図 2. 5 - 1 参照)

基盤(4km/s)中に断層の低速度帯(2km/s)を仮定した領域には、高さ-120mの距離程 220~280m 付近に 3.6km/s 以下の 10%以上の速度低下領域が認められる。また、中間層(2km/s)には速度変化は仮定していないが、中央部にやや高速度域とその側方にやや低速度域が分布している。これらは、モデル計算時の誤差と考えられる。

(2) ケース 2 (図 2. 5 - 2 参照)

45°の傾斜を仮定した基盤の低速度帯(断層)位置には、解析結果にも 10%以上(3.6km/s 以下)の速度低下が認められる。傾きの方向も定性的には合致する。

(3) ケース 3 (図 2. 5 - 3 参照)

中間層に断層(1km/s)を仮定することによって、中間層に観測走時作成時に入力したと同等の幅 40m の低速度帯が 10%以上の速度低下領域として認められる。また、基盤での低速度域もケース 1 よりも顕著に分布している。

(4) ケース4 (図2. 5-4 参照)

速度変化の絶対値は、ケース3の断層傾斜 90° の場合と同等である。中間層の低速度領域の傾きは、仮定した 45° ほど低角ではないが、定性的には合致する。

(5) ケース5 (図2. 5-5 参照)

測線中央部に 3.8km/s 以下(5%以上)の低速度域は認められるが、ケース1(断層幅 40m)と比較すると、不明瞭である。現地測定データの解析を想定すると、5%程度の誤差は常に考えられるので、この程度の低速度帯を現地調査で捕らえることは困難である。

(6) ケース6 (図2. 5-6 参照)

ケース5と同様に測線中央部に低速度帯は認められるが、不明瞭である。また、仮定した断層の角度までは再現されていない。

(7) ケース7 (図2. 5-7 参照)

中間層に断層(1km/s)を仮定することによって、中間層に観測走時作成時に入力したと同等の幅 20m の低速度帯が10%以上の速度低下領域として認められる。また、基盤での低速度域もケース5よりもやや顕著に分布している。

(8) ケース8 (図2. 5-8 参照)

速度変化の絶対値は、ケース7の断層傾斜 90° の場合と同等である。中間層の低速度領域の傾きは、仮定した 45° ほど低角ではないが、定性的には合致する。

(9) ケース9 (図2. 5-9 参照)

断層幅 20m のケース7に比べると、基盤の低速度域は、より不明瞭となっているが、中間層の速度低下は、ほとんど変わらない。

(10) ケース10 (図2. 5-10 参照)

断層幅 20m のケース8と比較すると、中間層、基盤ともに速度低下量は、小さく、5%程度である。観測走時計算時の速度構造モデルで仮定した断層の傾斜の傾向は、再現されているが、現地測定データの解析では、誤差によって検知することは困難である。

表2. 5-5 各パラメータ変化に対して得られた速度構造の特徴

| 項目 | 速度構造の特徴 |
|---------|--|
| 断層の幅 | <p>基盤のみに垂直な 90° の低速度帯を設定したケース1(幅 40m)とケース5(幅 20m)とを比較すると、ケース1では基盤に幅 70m 程度で 10%以上の速度低下域が認められるが、ケース5では5%以上の速度低下域しか認められない。</p> <p>また、基盤のみに 45° の傾斜した低速度帯を設定したケース2(幅 40m)とケース6(幅 20m)とを比較すると、ケース2では基盤に傾きを持った 10%以上の速度低下域が認められるが、ケース6では基盤には5%以上の速度低下域しか認められず、かつ、傾きは全く検知されていない。</p> <p>中間層と基盤の両方に垂直な 90° の低速度帯を設定したケース3(幅 40m)、ケース7(幅 20m)およびケース9(幅 10m)を比較すると、ケース3では中間層、基盤ともに 10%以上の速度低下域が認められるが、ケース7では 10%以上の速度低下域は中間層のみなり、基盤には 5%以上の速度低下域しか認められない。さらに、ケース9では中間層にはまだ 10%以上の速度低下域は認められるが、基盤の 5%以上の速度低下域はほとんど認められなくなる。</p> <p>中間層と基盤の両方に 45° の傾斜した低速度帯を設定したケース4(幅 40m)、ケース8(幅 20m)およびケース10(幅 10m)を比較すると、ケース4では中間層、基盤ともに傾きを持った 10%以上の速度低下域が認められるが、ケース8では傾きを持った 10%以上の速度低下域は中間層のみなり、基盤には 5%以上の速度低下域しか認められない。さらに、ケース10では中間層、基盤ともに 5%以上の速度低下域のみ認められる。</p> |
| 断層の傾き | <p>基盤のみに断層幅 40m で低速度帯を設定したケース1(傾き 90°)とケース2(傾き 45°)とを比較すると、ケース2の低速度帯の傾きは定性的には合っている。</p> <p>中間層と基盤の両方に断層幅 40m で低速度帯を設定したケース3(傾き 90°)とケース4(傾き 45°)とを比較すると、ケース4では中間層の低速度帯の傾きは良く再現されている。</p> <p>基盤のみに断層幅 20m で低速度帯を設定したケース5(傾き 90°)とケース6(傾き 45°)とを比較すると、基盤の低速度帯の傾きは全く再現されない。</p> <p>中間層と基盤の両方に断層幅 20m で低速度帯を設定したケース7(傾き 90°)とケース8(傾き 45°)とを比較すると、ケース8では中間層の低速度帯の傾きは良く再現されている。</p> <p>中間層と基盤の両方に断層幅 10m で低速度帯を設定したケース9(傾き 90°)とケース10(傾き 45°)とを比較すると、ケース10の中間層の低速度帯の傾きは不明瞭である。</p> |
| 断層の速度構造 | <p>同じ断層幅・傾きで、中間層に低速度帯を設定しないケース(1, 2, 5, 6)と、対応するケース(3, 4, 7, 8)のそれぞれを比較すると、どれを取っても、中間層に低速度帯を設定した方(ケース3, 4, 7, 8)が低速度帯に関する感度が良い。これは、各ケースの解析結果図(図2. 5-1~10)中の下段に示した波線図からもわかるように、低速度帯の設定領域に通過する波線数の影響であると考えられる。</p> |

(11) ケース8の起振点間隔を変化させた解析結果(図2. 5-11、-12参照)

図2. 5-11の速度分布図で各起振点間隔における測線中央部での低速度帯の捕捉状況を見ると、起振点間隔 80m までは、中間層の低速度帯が速度値 10%以上の速度低下域として認められるが、起振点間隔 160m になると急激に速度低下量が小さくなり、10%以上の速度低下域はほとんど認められなくなる。

この結果より、今回のモデル解析で設定した表 2. 5 - 1 の解析メッシュ数 (750) では、表 2. 5 - 4 の起振点間隔 80m 程度の解析波線数 (350) 以上の走時データが必要と考えられる。この解析メッシュ数と解析波線数の関係を、2. 1 のインバージョン解析に使用した屈折法弾性波探査データ (表 2. 2 - 2) に当てはめると、10m 間隔の解析メッシュでは解析メッシュ数は 7568 (22×172) となり、 $7568 \times (350 / 750) \doteq 3532$ の解析波線数が必要となる。ゆえに、既存の屈折法弾性波探査測線で、図 2. 5 - 8 に示したケース 8 の 20m 程度の断層幅の低速度帯を捕捉するためには、既存の走時データ数 (解析波線数) は表 2. 2. - 2 から 1470 であるので、既存資料の ($3532 / 1470 \doteq$) 2.4 倍程度の走時データが必要であると考えられる。

(12) まとめ

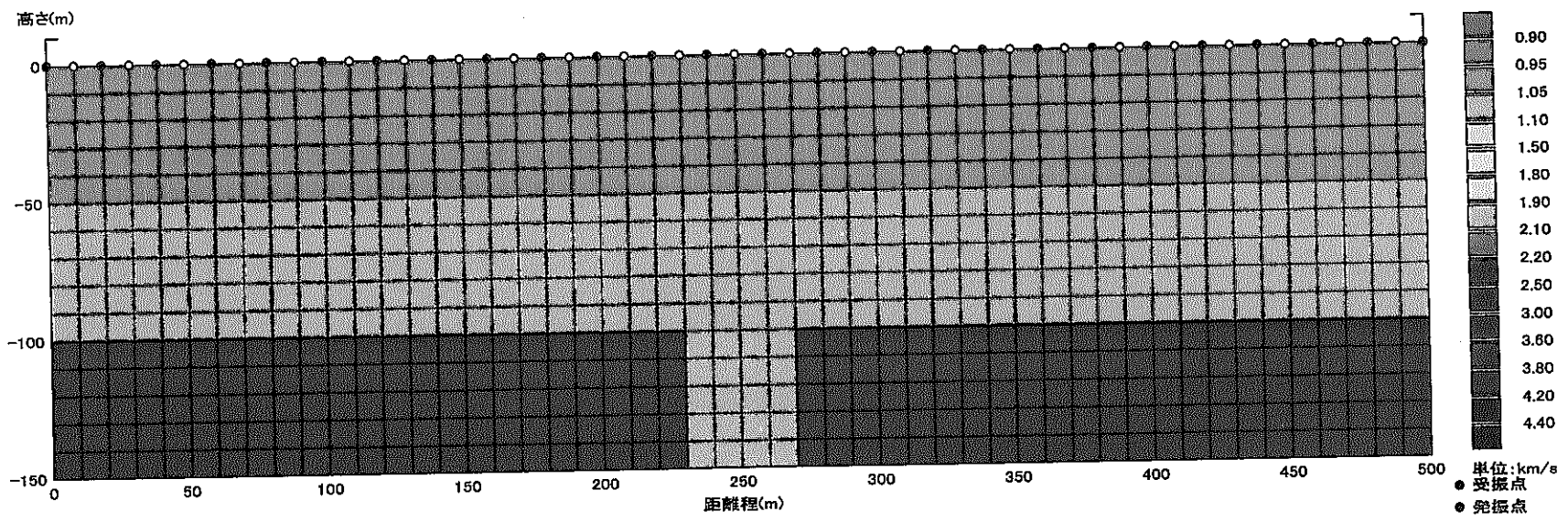
以上の結果から、以下のことが判明した。

- ① 今回の速度構造で基盤の低速度帯を検知するための低速度帯幅は、ノイズや誤差が小さく、低速度帯の速度が周囲の $1 / 2$ の状況で、基盤上面深度 (100m) の $1 / 5$ (20m) 程度以上であることが推測される。また、中間層から低速度帯が認められる場合には、断層の角度も含めて検知できる可能性がある。
- ② 再解析に使用した既存の屈折法弾性波探査測線で、メッシュ間隔 10m 程度の解析精度を得るためには、既存資料の 2.4 倍程度以上の走時データが必要である。この走時データ数を既存の弾性波測線 (1700m) にあてはめると、起振点間隔 : 80m、受振点間隔 : 10m、最大地震波到達距離 : 500m 以上の測定が必要となる。もし、今回の再解析測線で当初からここで述べた程度の仕様で測定されていたなら、インバージョンによる再解析によって、既存情報がなくとも、月吉断層を精度良く補足できた可能性がある。
- ③ インバージョン法では、解析条件に見合う走時データを取得し、各解析メッシュ上で多方向に十分な波線密度を得ることができれば、中間層・基盤上面での断層などの低速度帯を把握できる可能性がある。
- ④ インバージョン法の中で今回用いた手法では、連続体を仮定した理論で解析しているので、急激な速度変化のある境界では誤差が大きくなることが予想される。また、基盤のみに低速度帯を仮定した場合、定量的に低速度帯の幅や傾きを再現することは困難である。

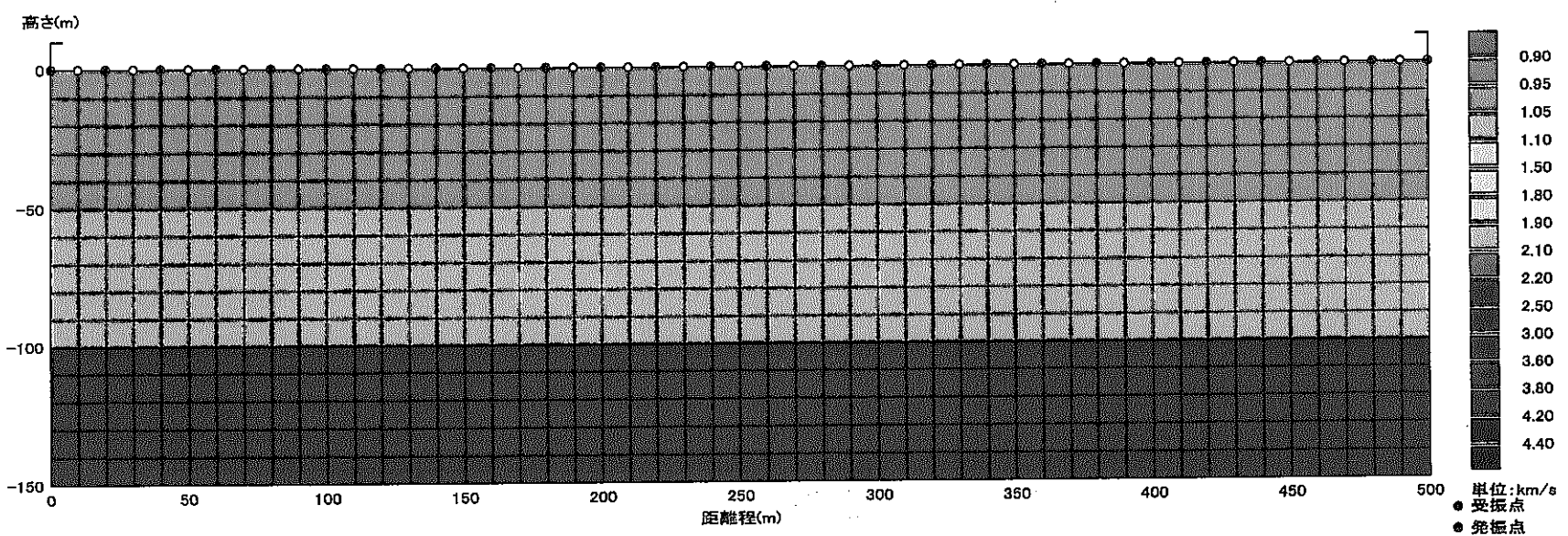
⑤萩原の方法では、従来から言われているように、地盤を数層の各層の上面深度程度の厚さを持った層構造と仮定できる場合には、インバージョン法と比較すると少ない走時データで地盤の速度構造を把握できる。また、地形が平坦で、単純に基盤のみに低速度帯が鉛直方向に存在する場合には有効であると考えられる。

⑥ただし、日本の地形・地質状況を考えると、断層が存在するような地域では、萩原の方法を精度良く適用できる地形・地質状況を持つ地域は少ない。また、月吉断層のような断層については、基盤だけでなく、その上位の中間層にも破碎帯や風化帯が存在することが多いので、特に、地下の地質構造に関するデータがない地域で弾性波探査を行なう場合には、②で述べたように、解析精度を考慮した調査計画を立て、インバージョン法による解析を行なうことが望ましい。

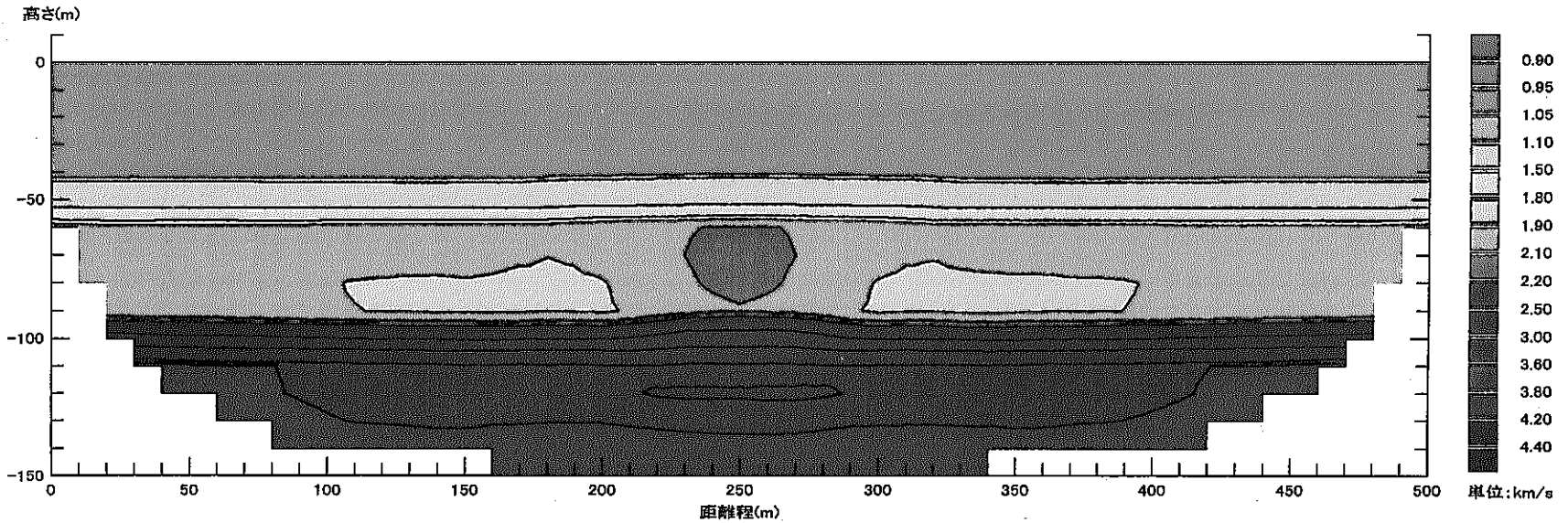
①低速度帯モデル(観測定時計算用モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布)



④インバージョン解析結果(波線図)

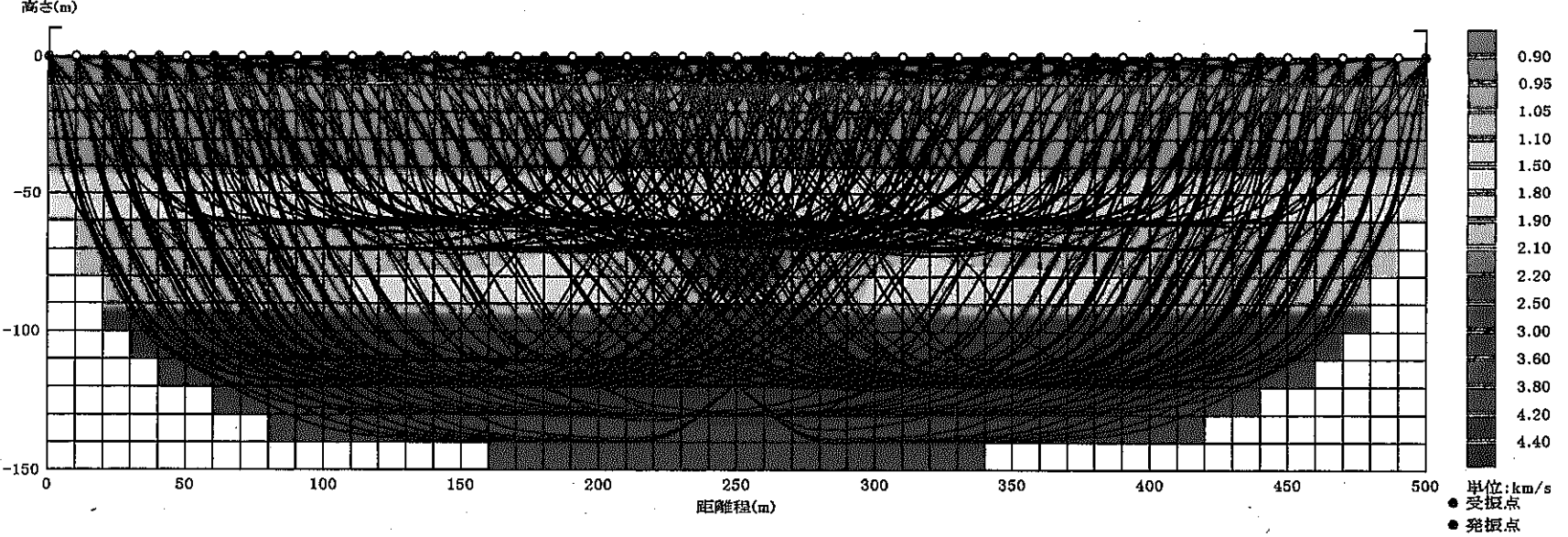
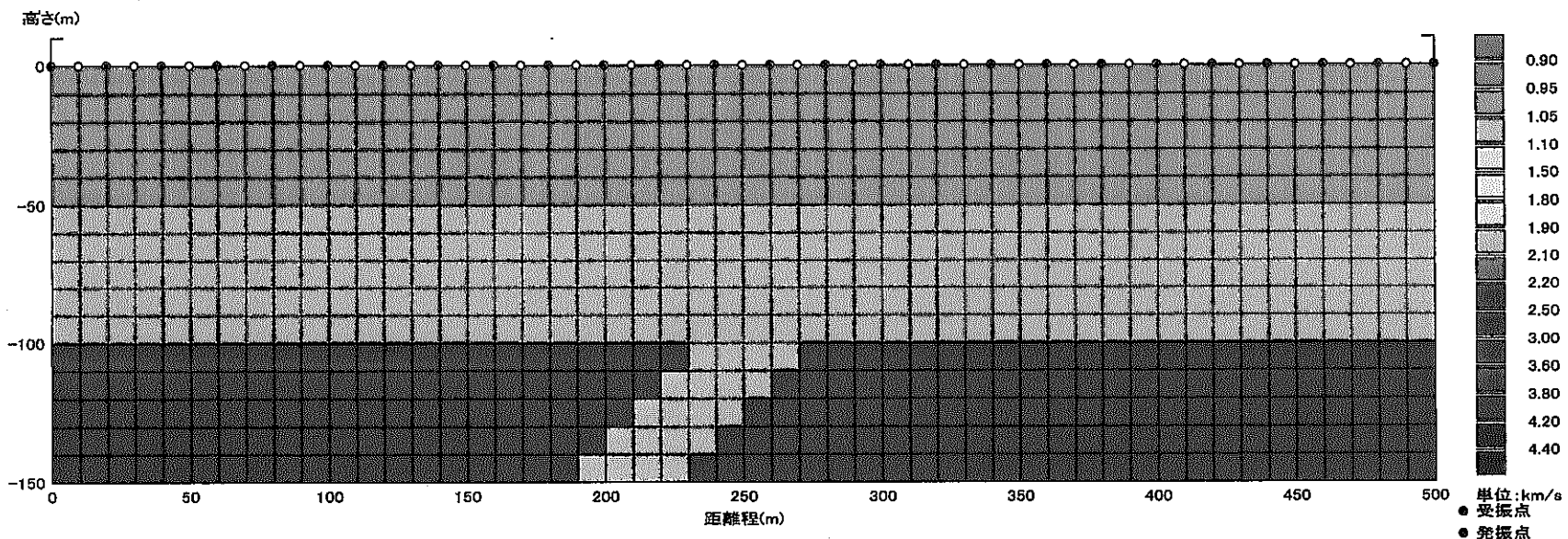
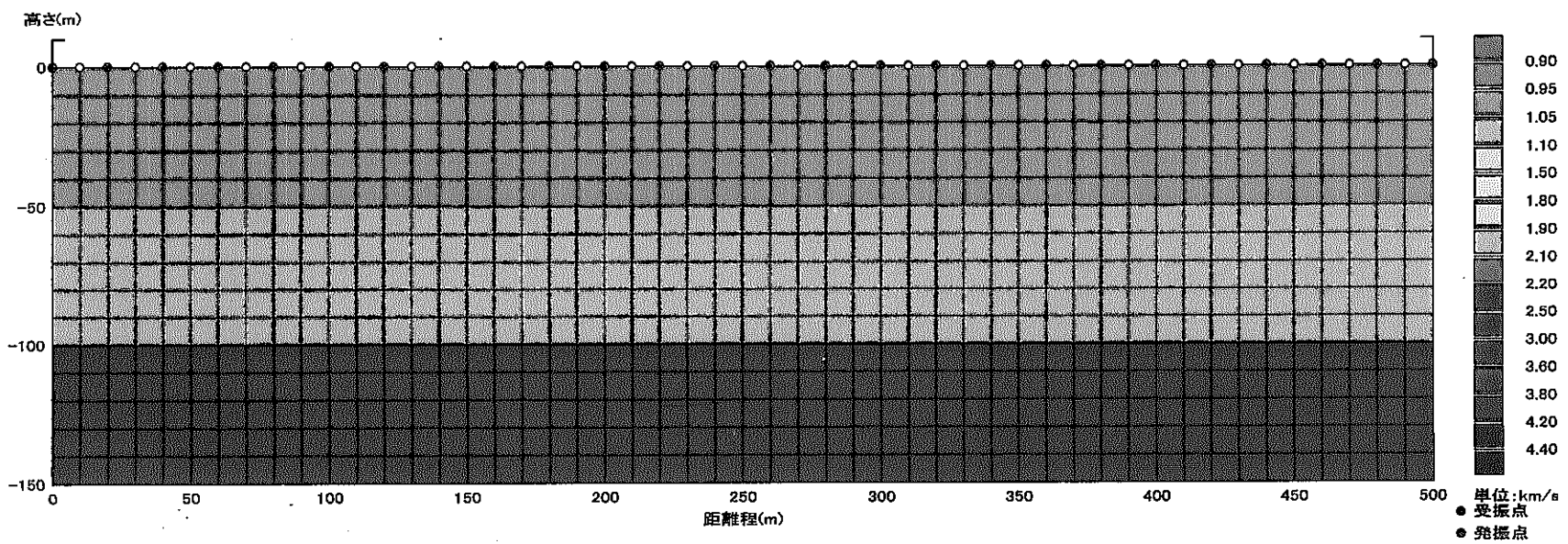


図 2.5-1 ケース 1 のモデル解析結果

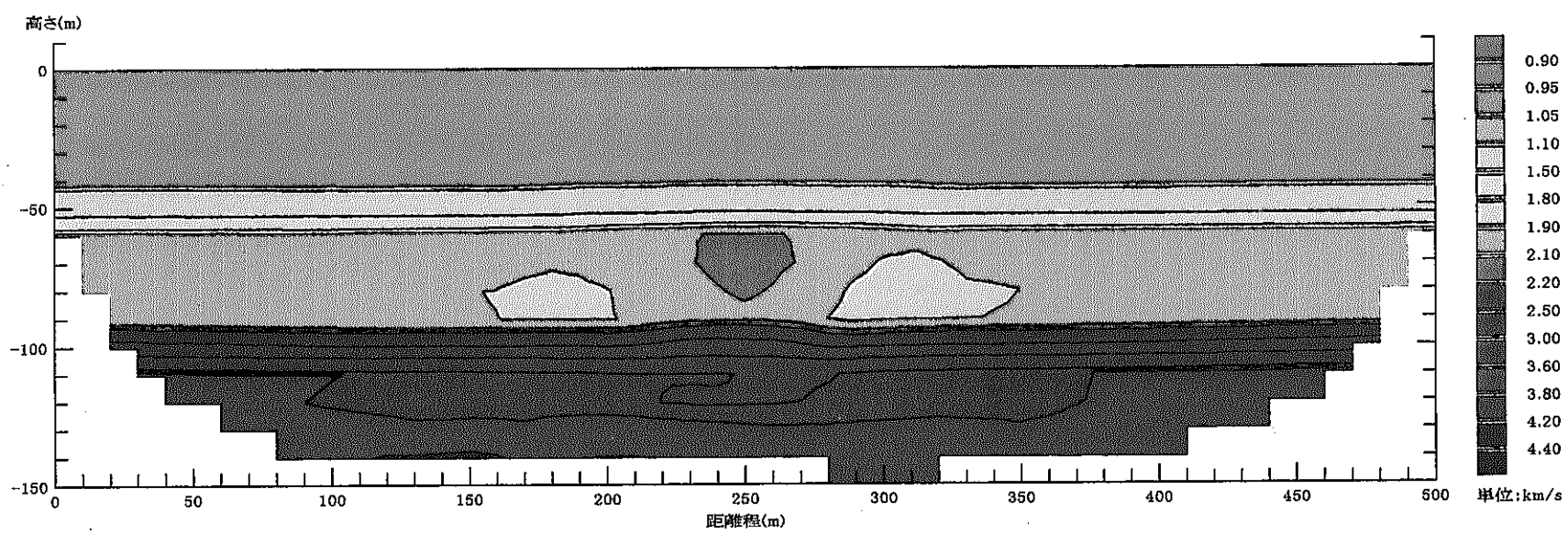
①低速度帯モデル(観測定時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布図)



④インバージョン解析結果(波線図)

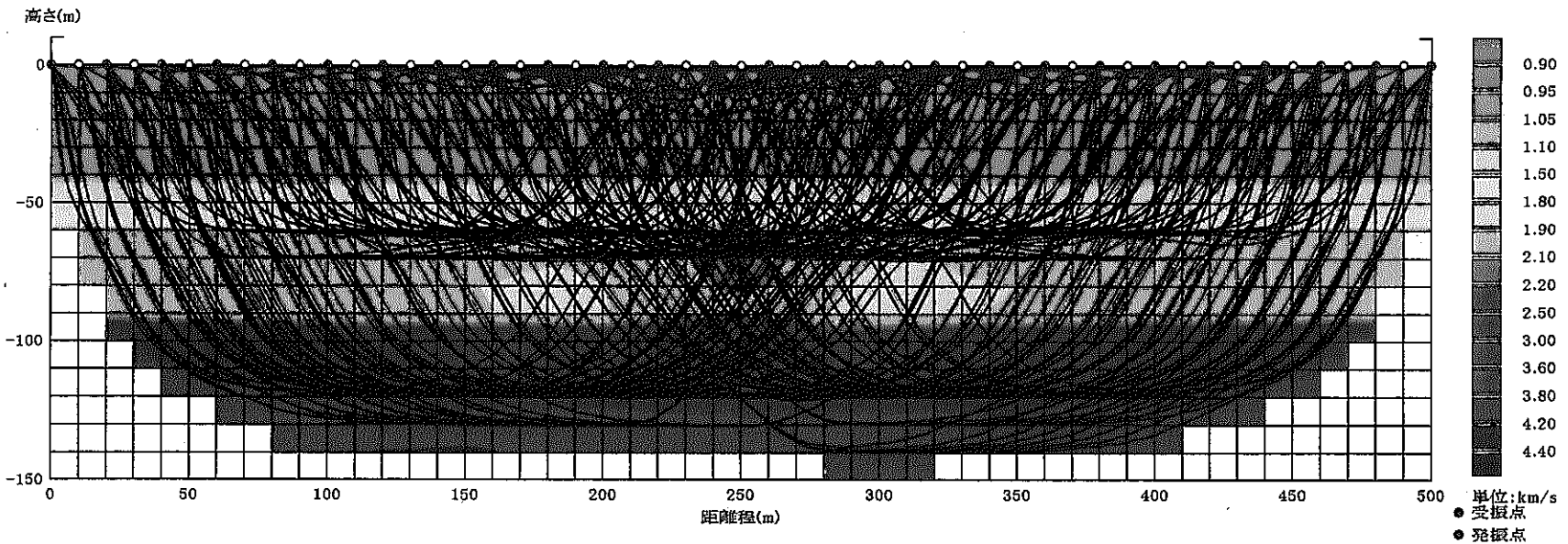
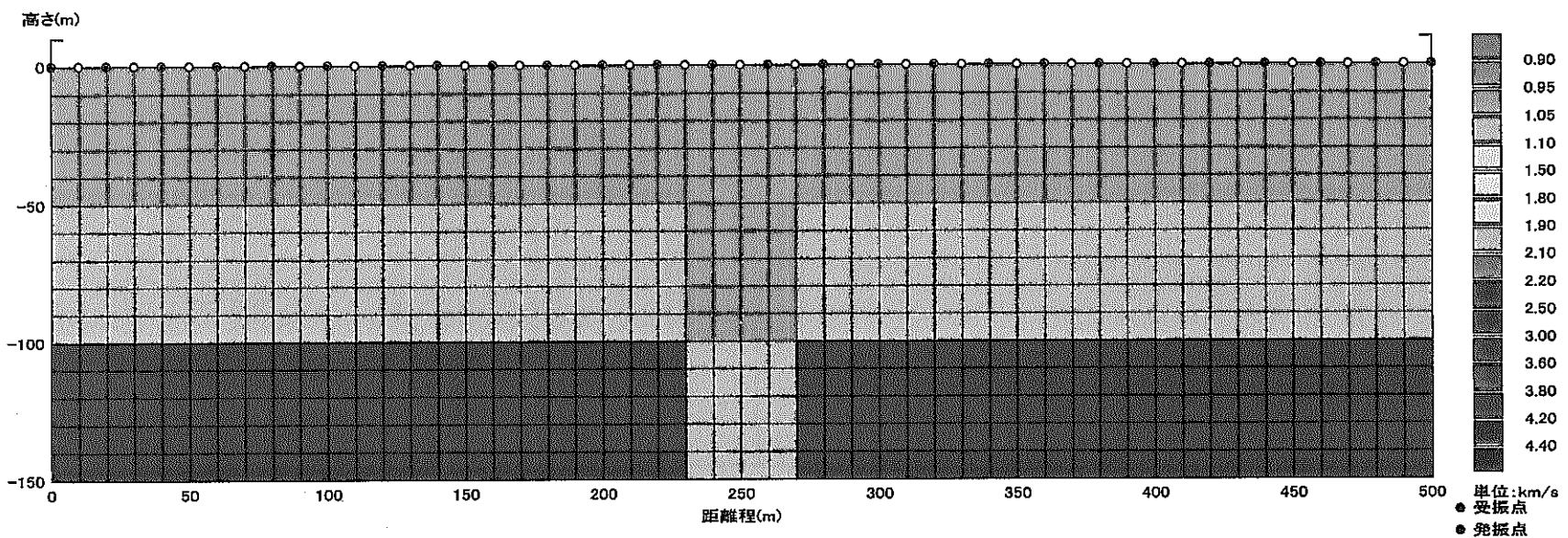
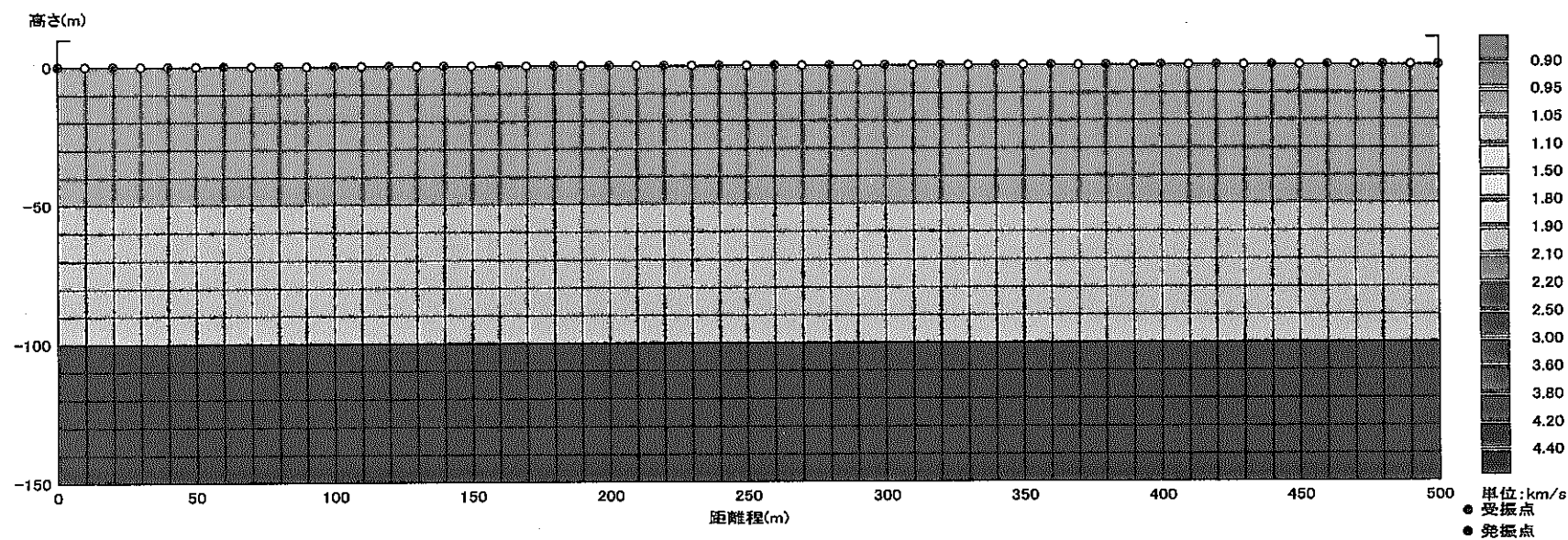


図 2.5-2 ケース 2 のモデル解析結果

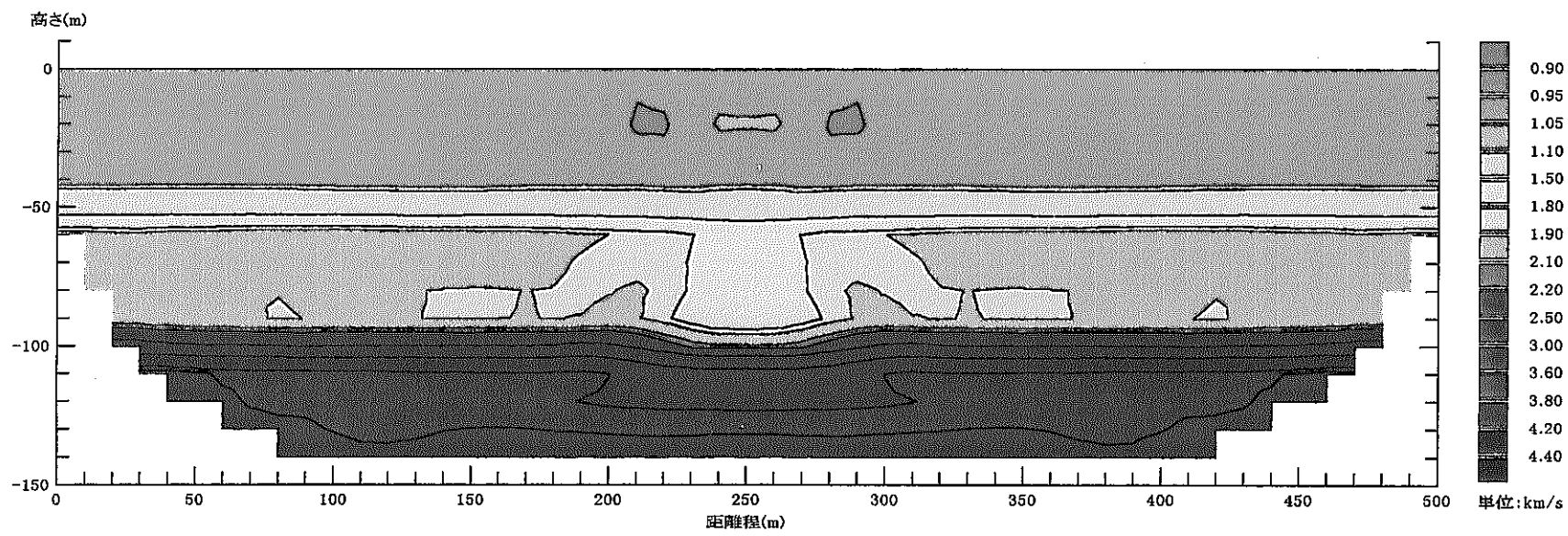
①低速度帯モデル(総測定時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布図)



④インバージョン解析結果(波線図)

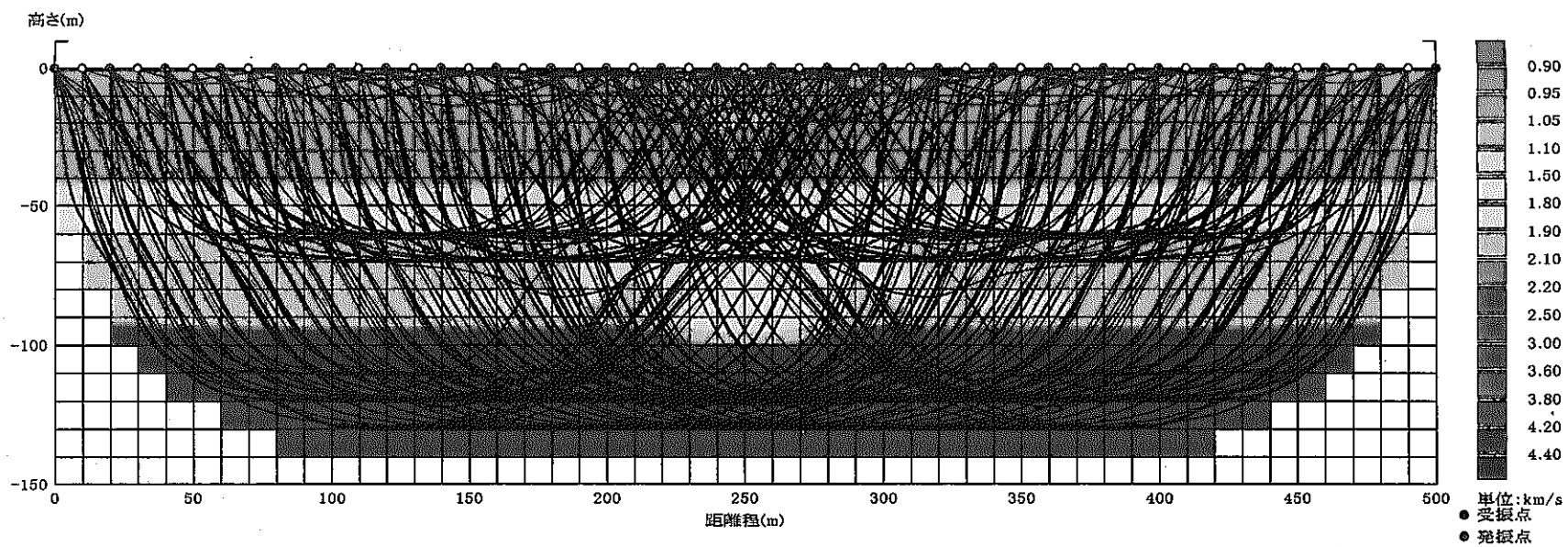


図 2.5-3 ケース 3 のモデル解析結果

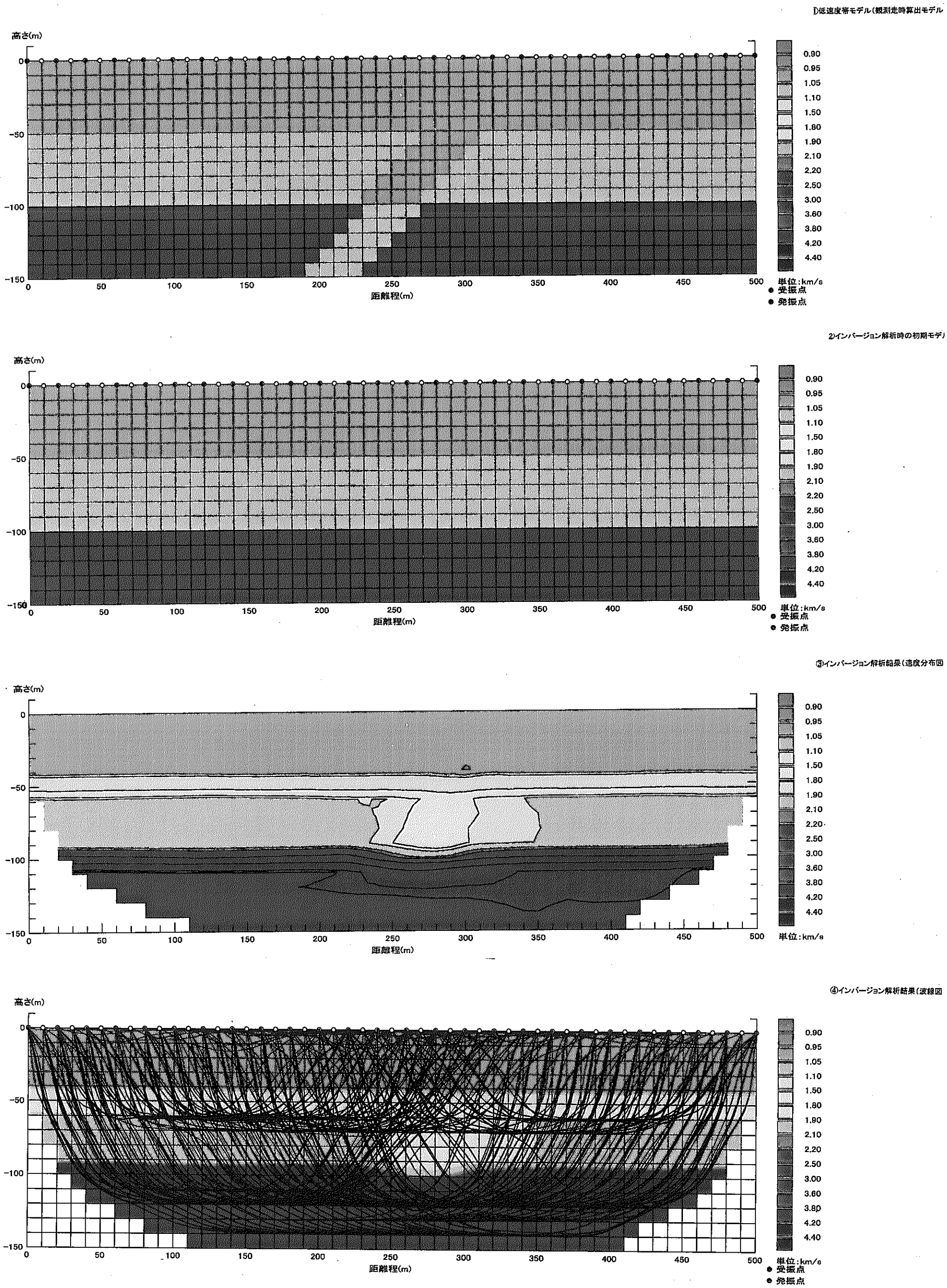


図 2.5-4 ケース 4 のモデル解析結果

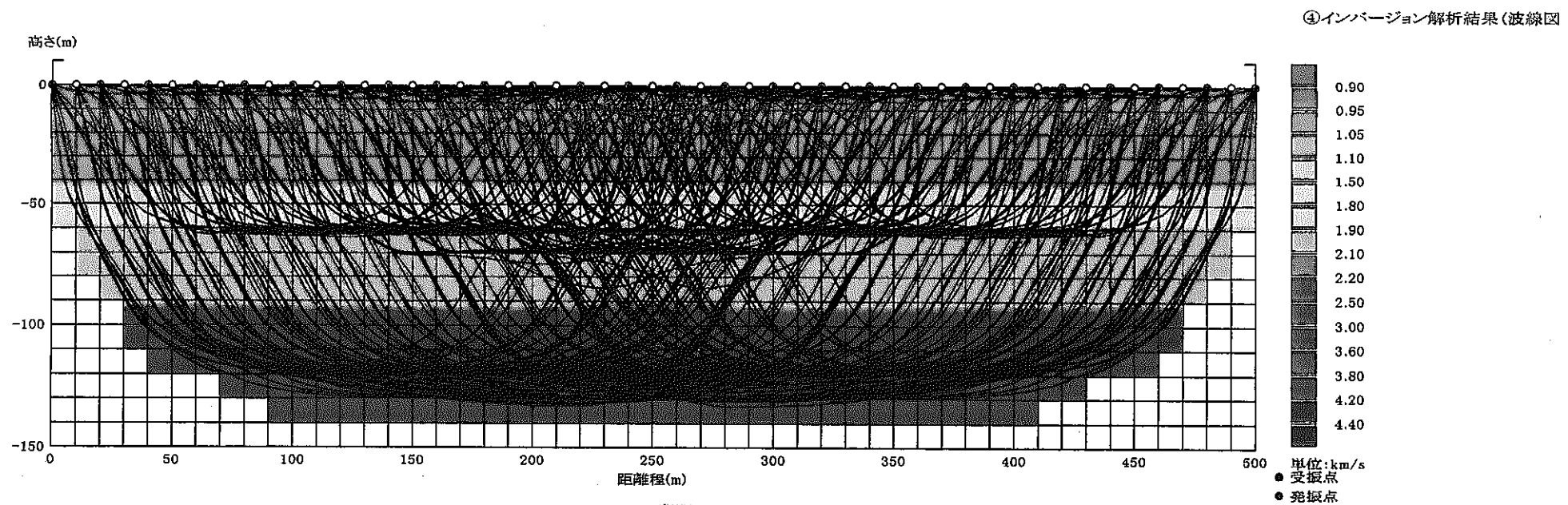
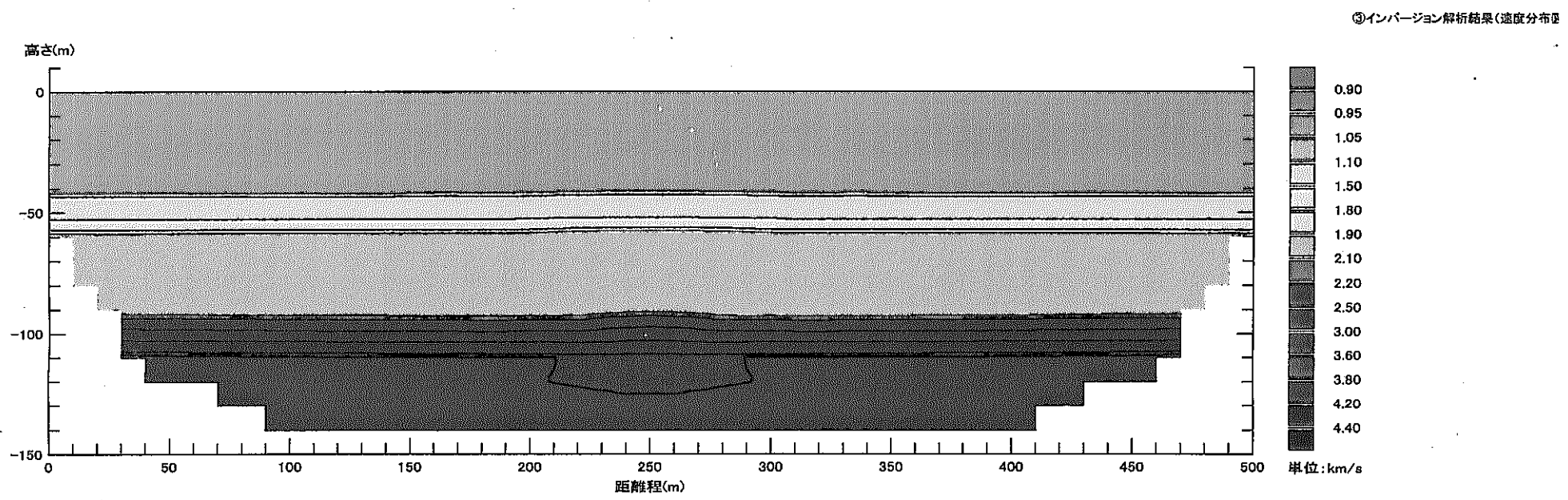
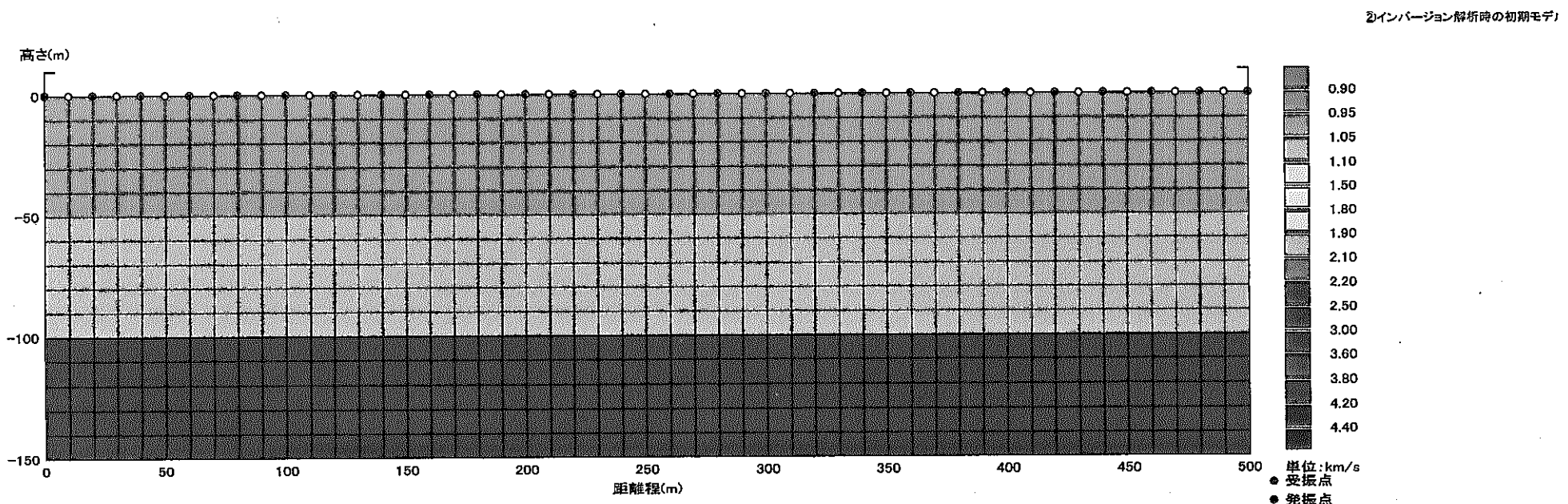
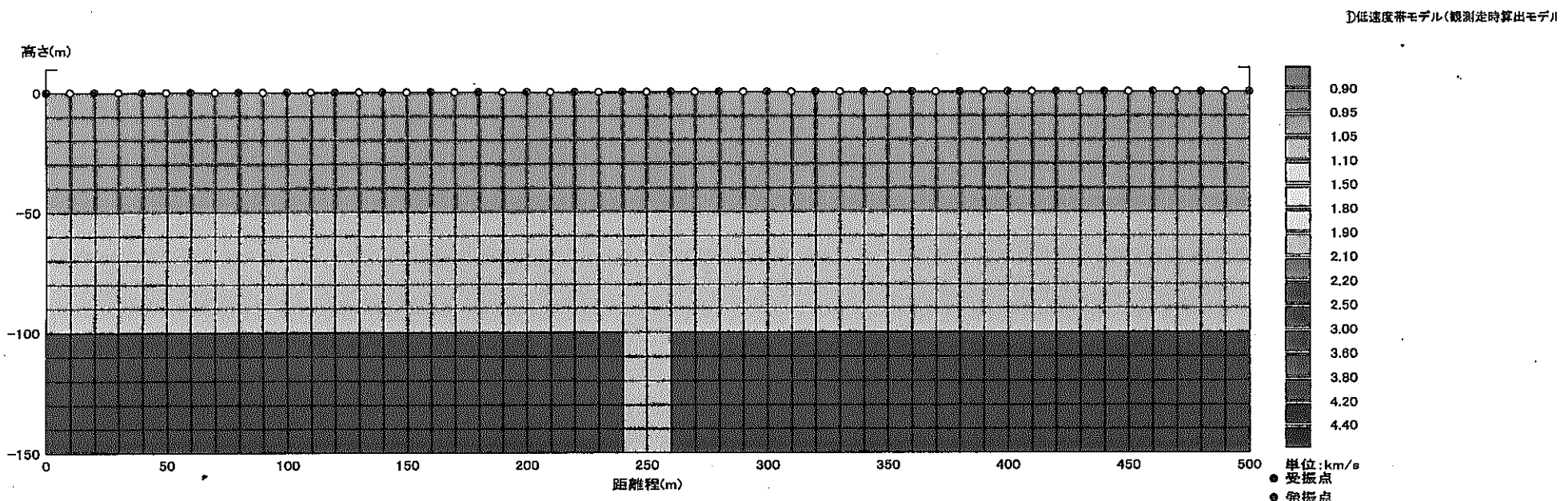
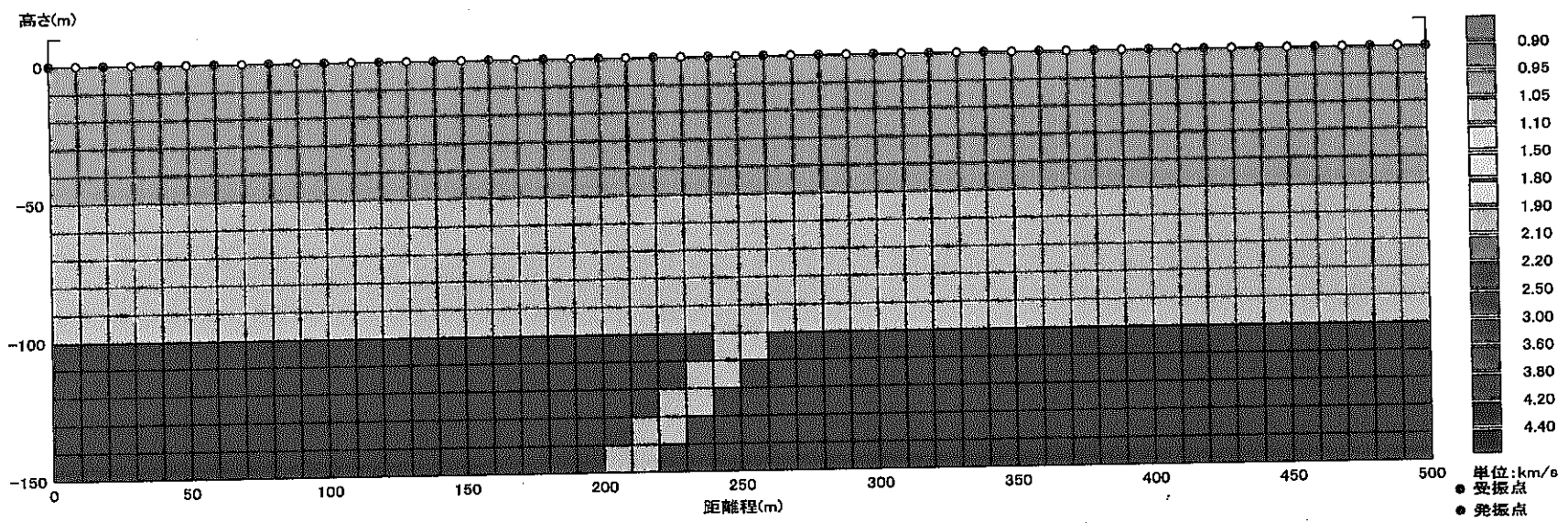
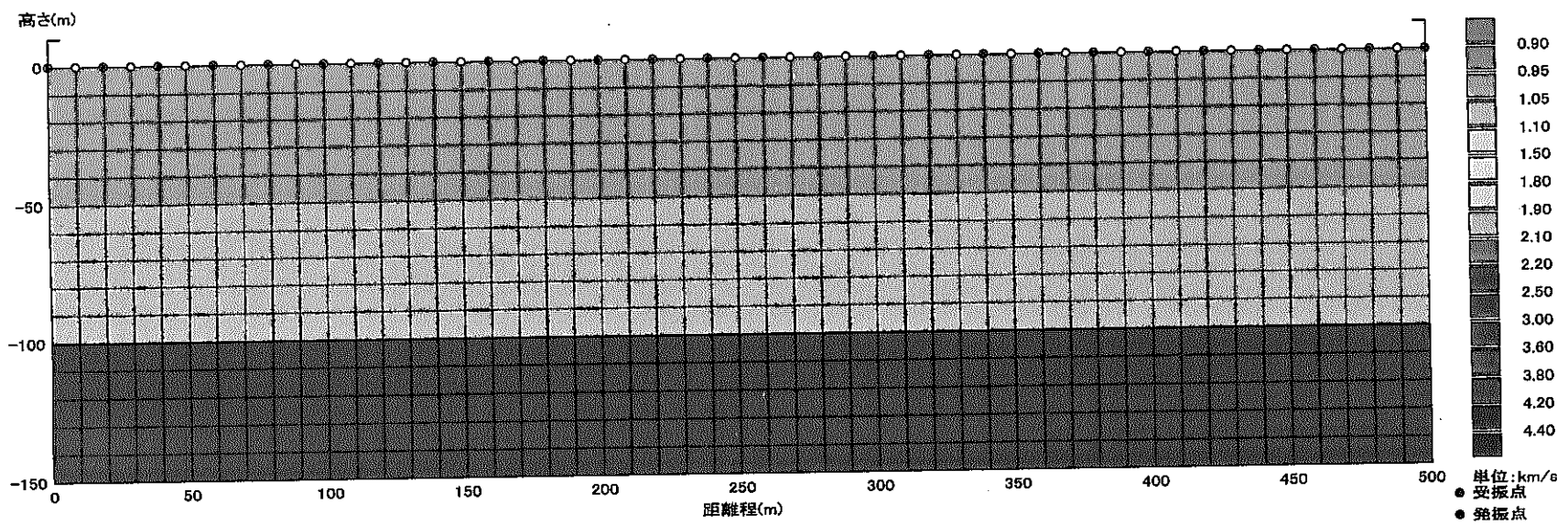


図 2.5-5 ケース5のモデル解析結果

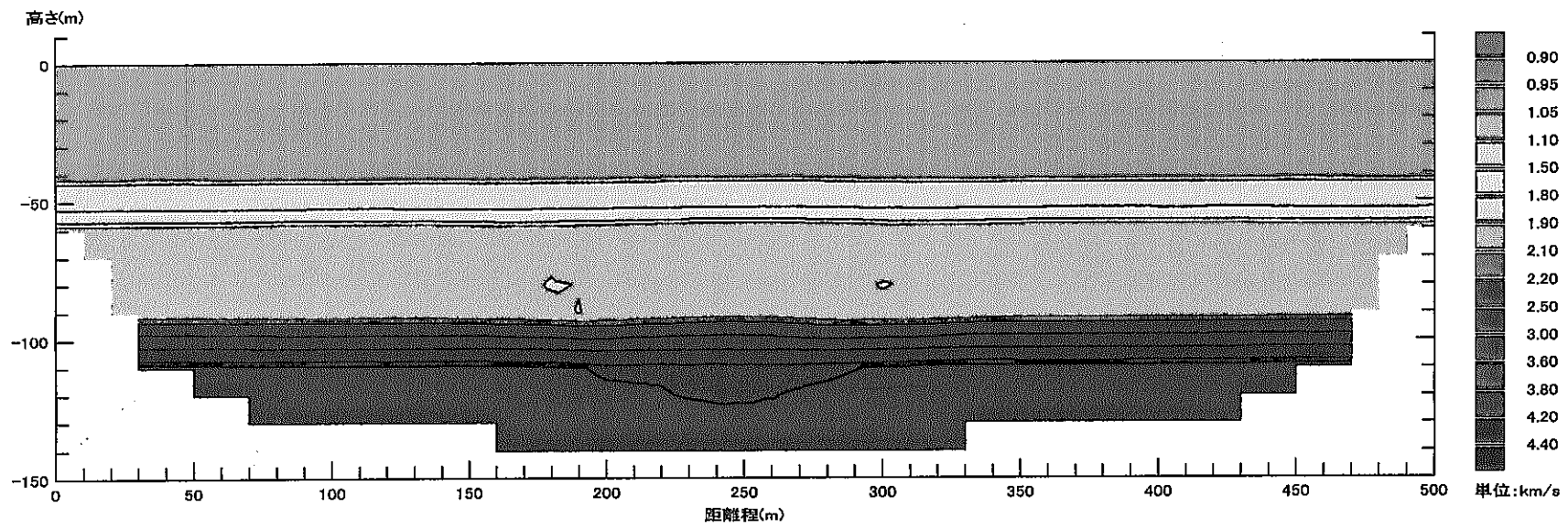
①低速度帯モデル(観測走時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布)



④インバージョン解析結果(波線図)

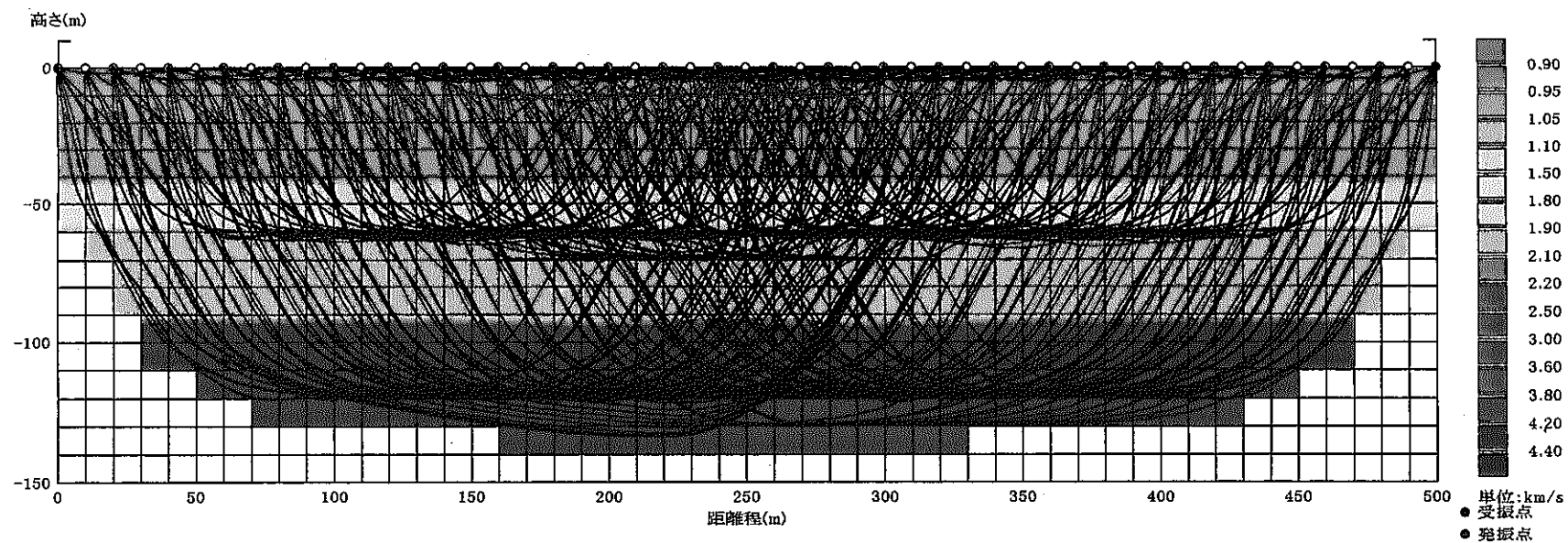
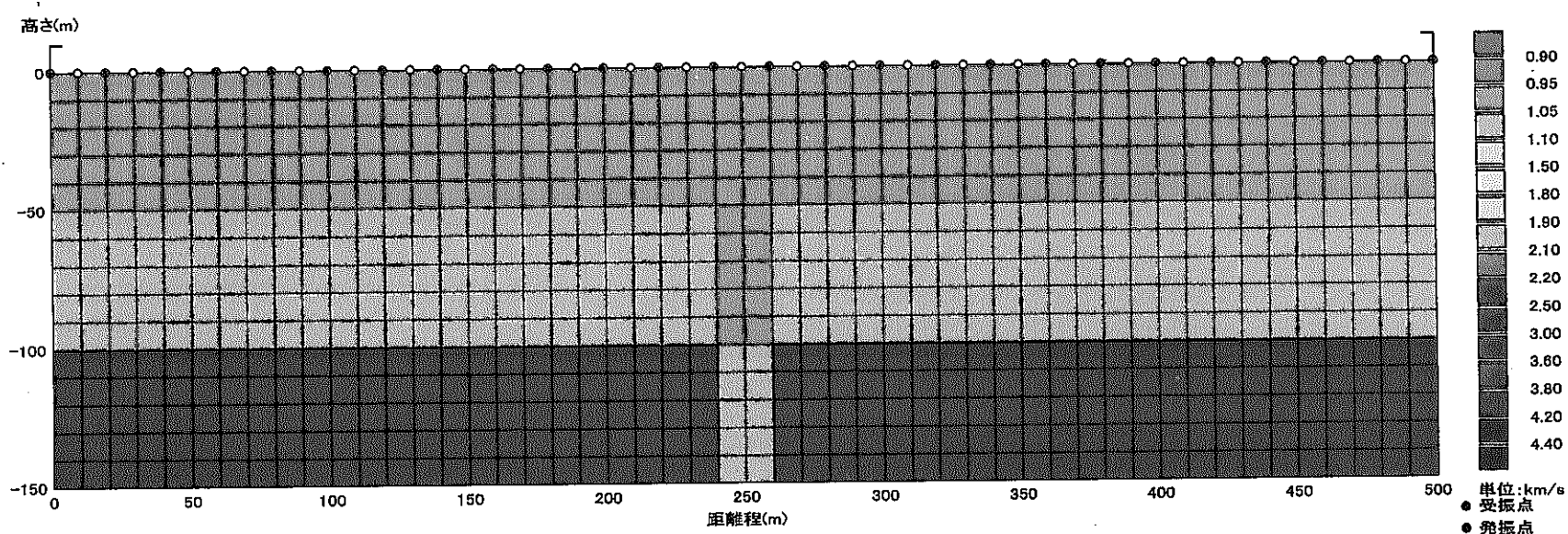
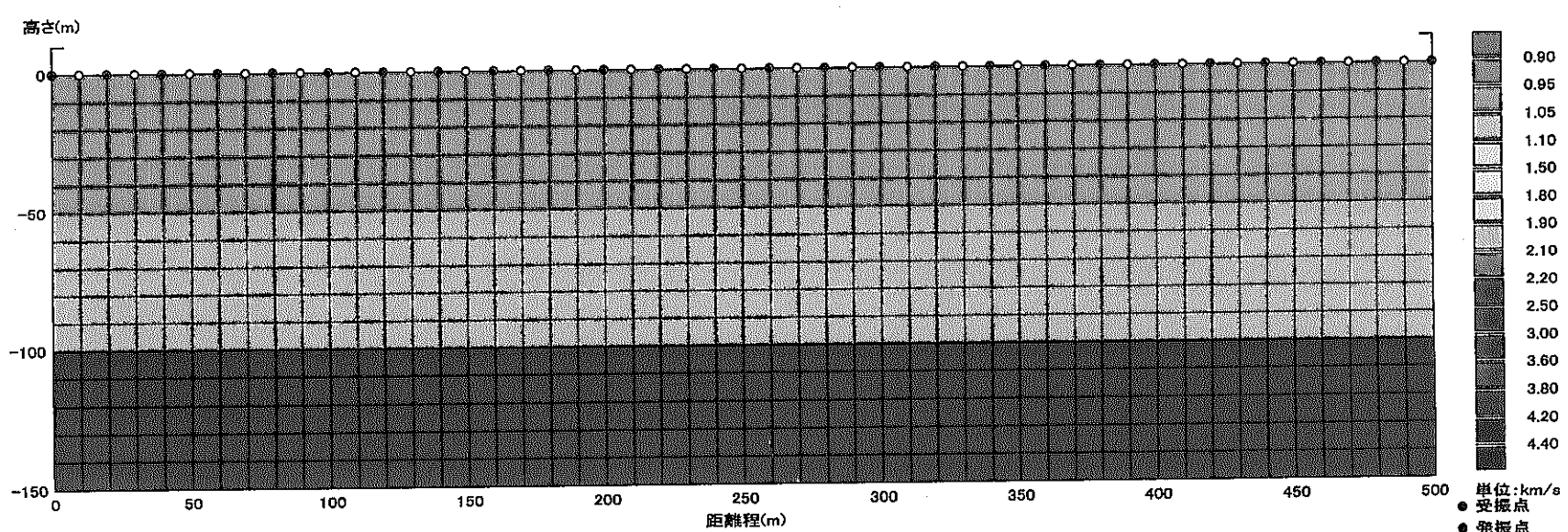


図 2.5-6 ケース 6 のモデル解析結果

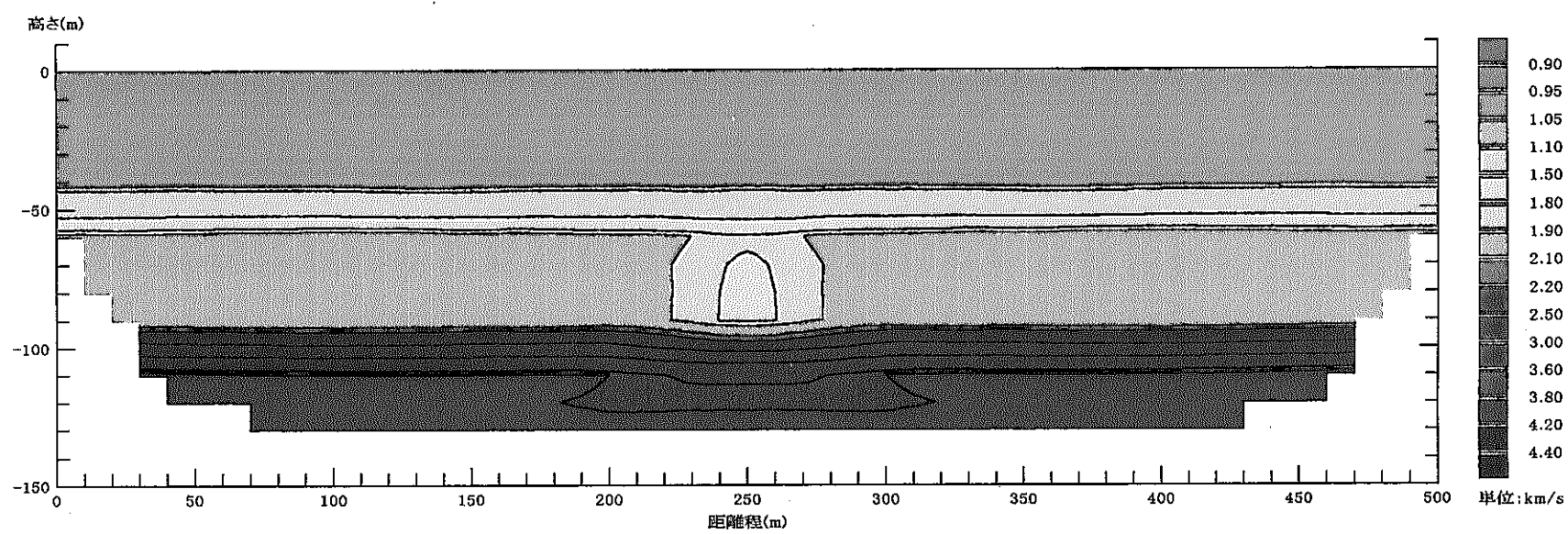
①低速度帯モデル(観測走時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布図)



④インバージョン解析結果(波線区)

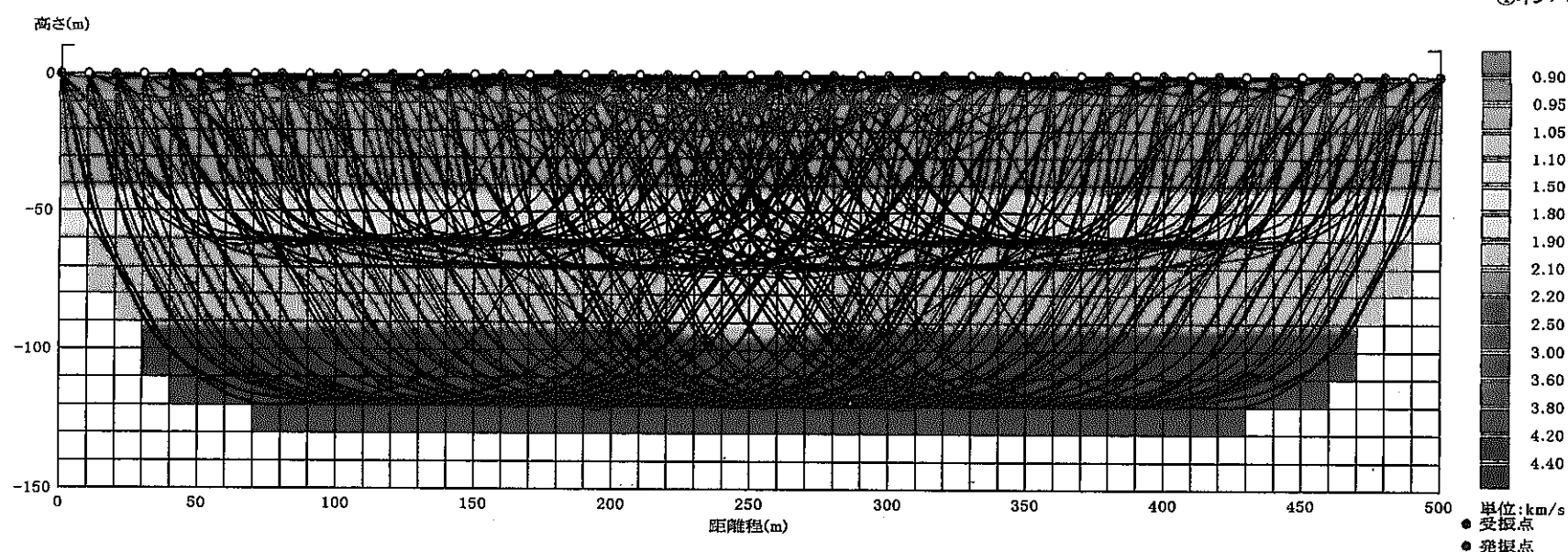


図 2.5-7 ケース7のモデル解析結果

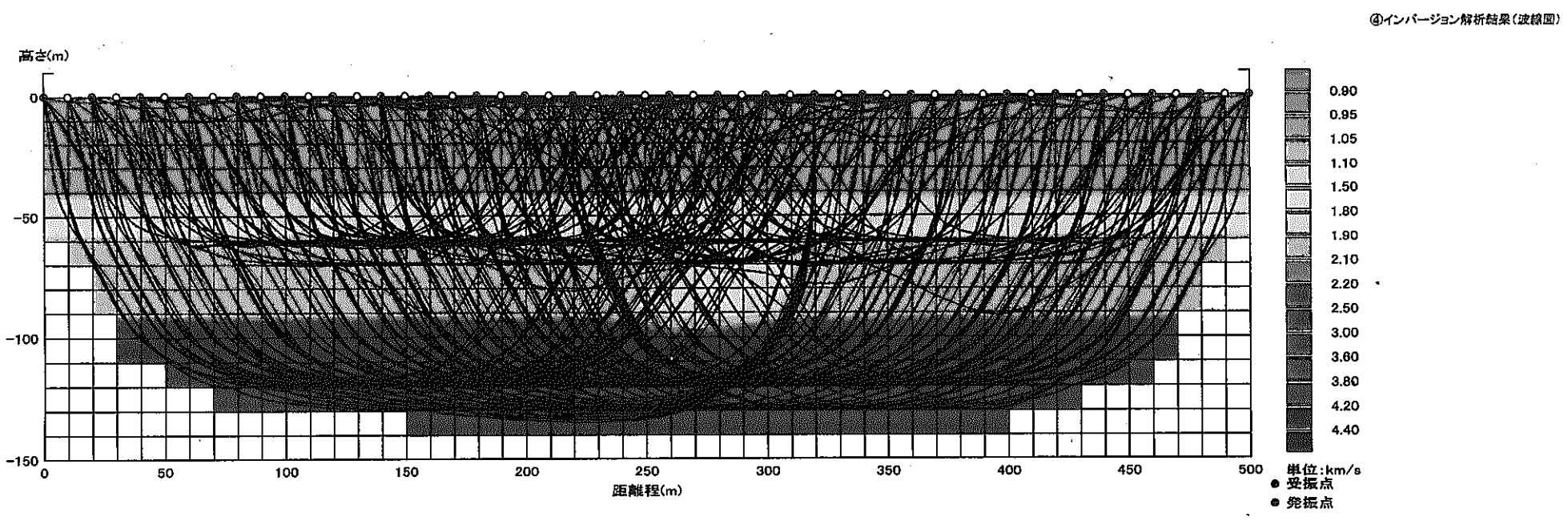
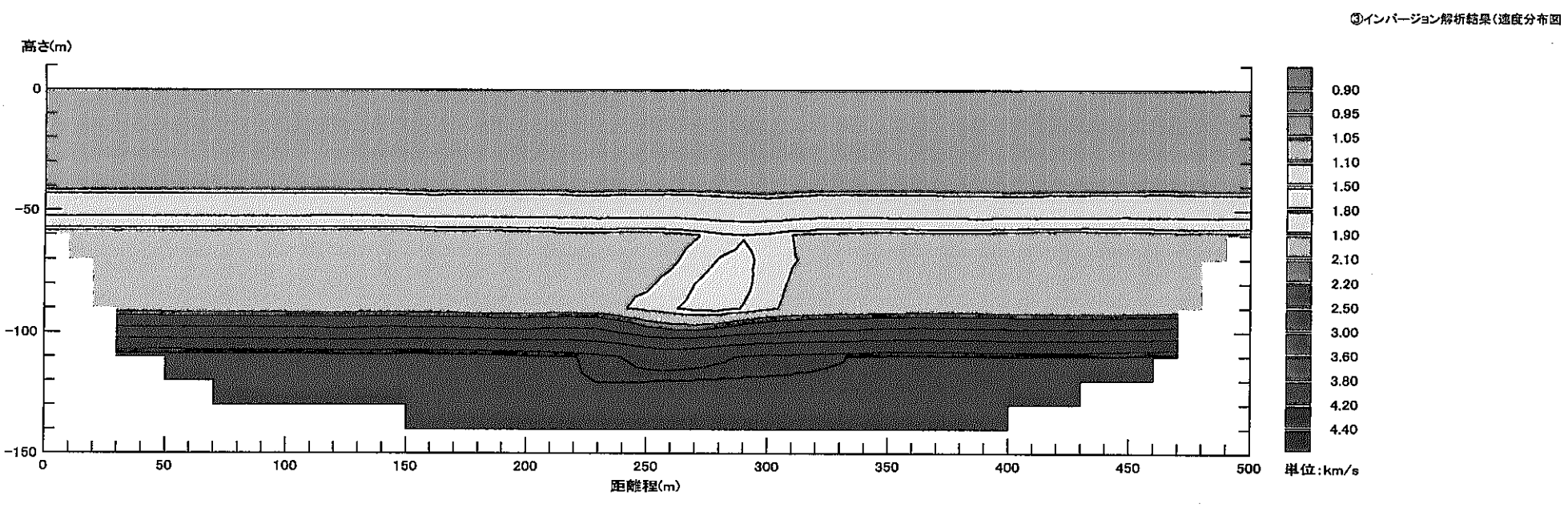
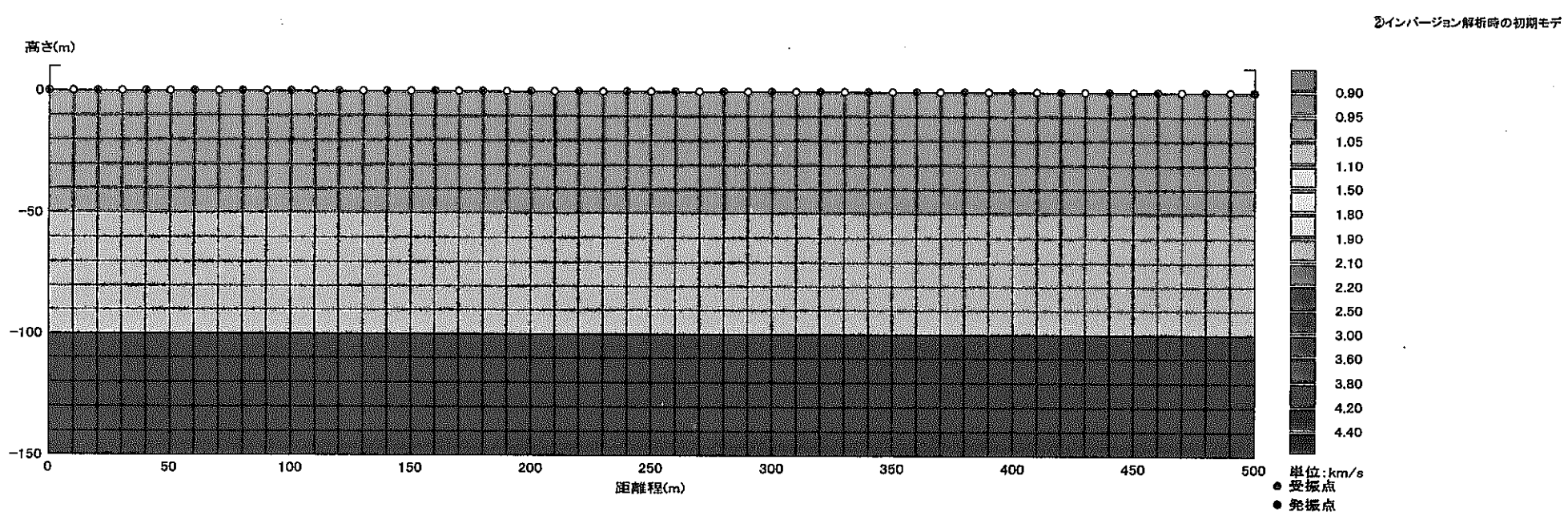
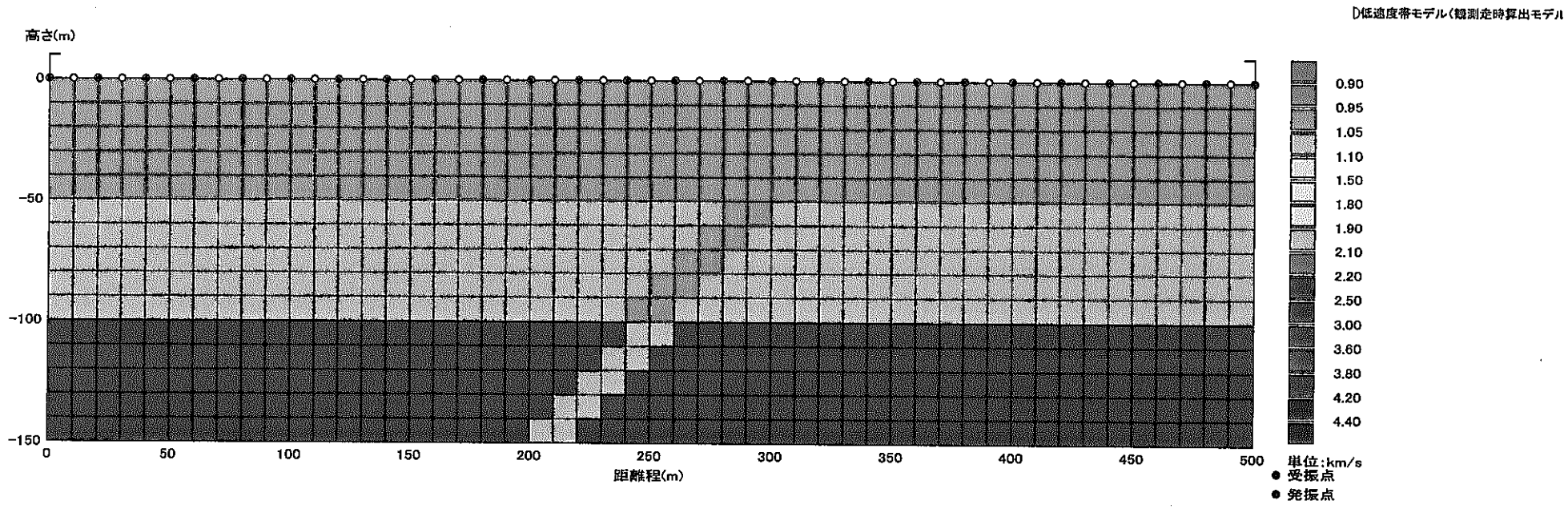
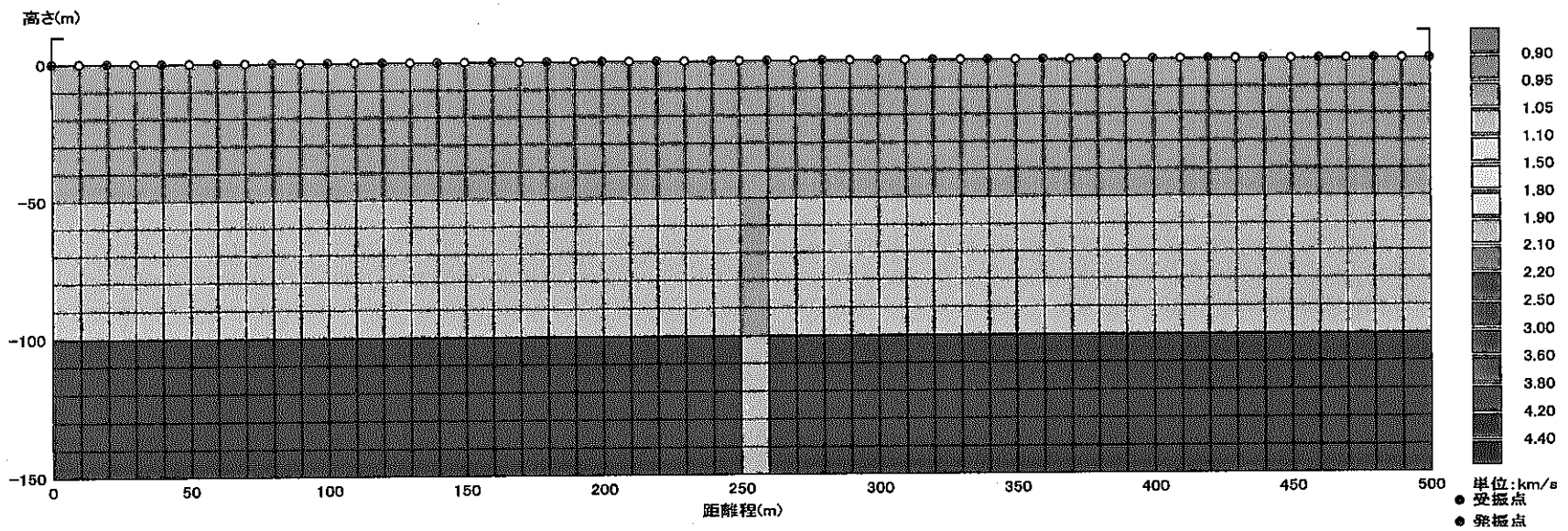
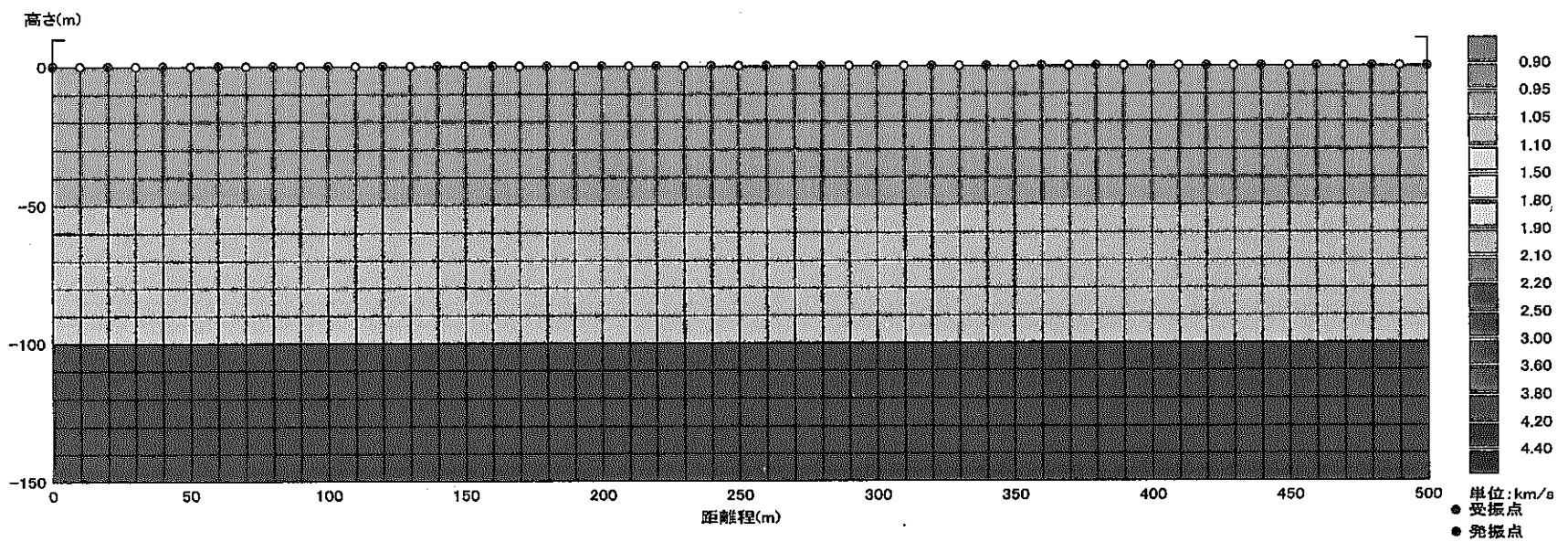


図 2.5-8 ケース 8 のモデル解析結果

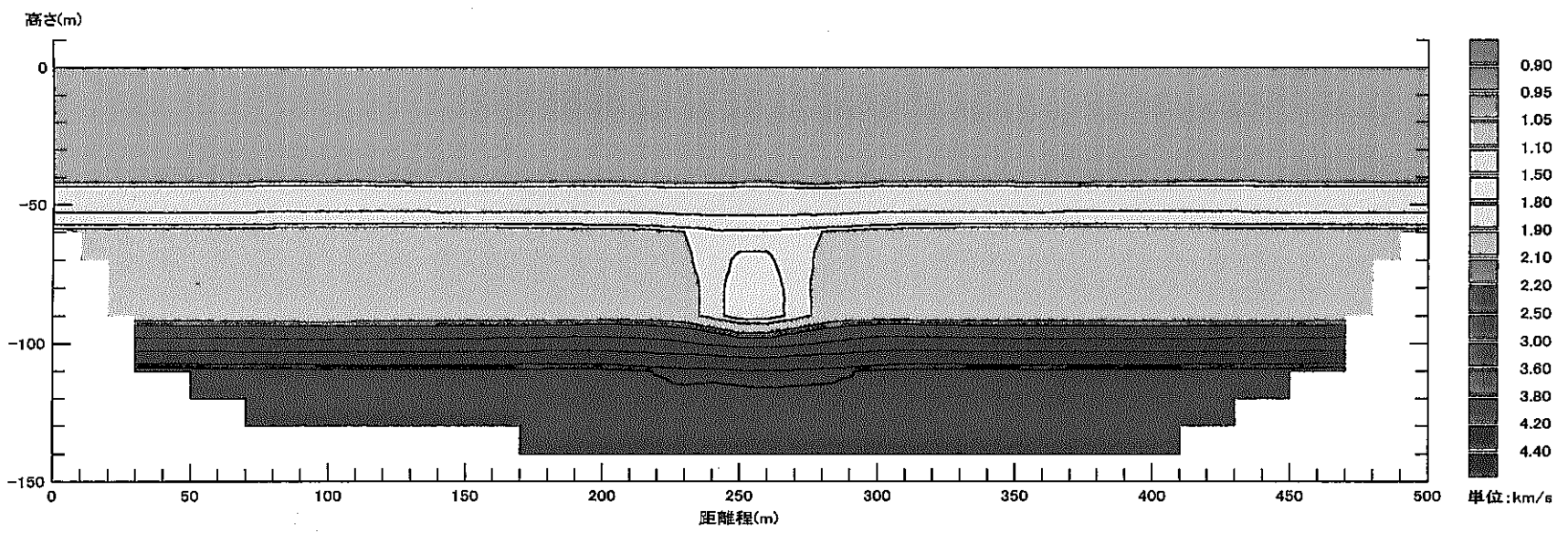
①低速度帯モデル(観測走時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布図)



④インバージョン解析結果(波線図)

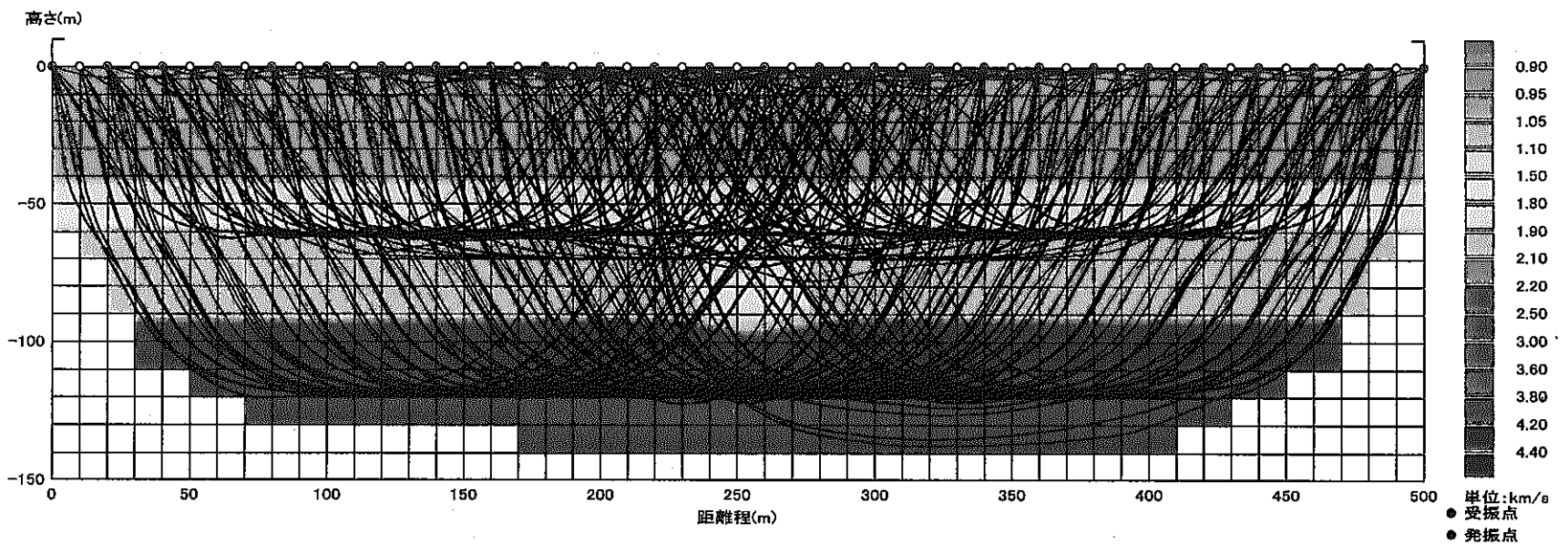
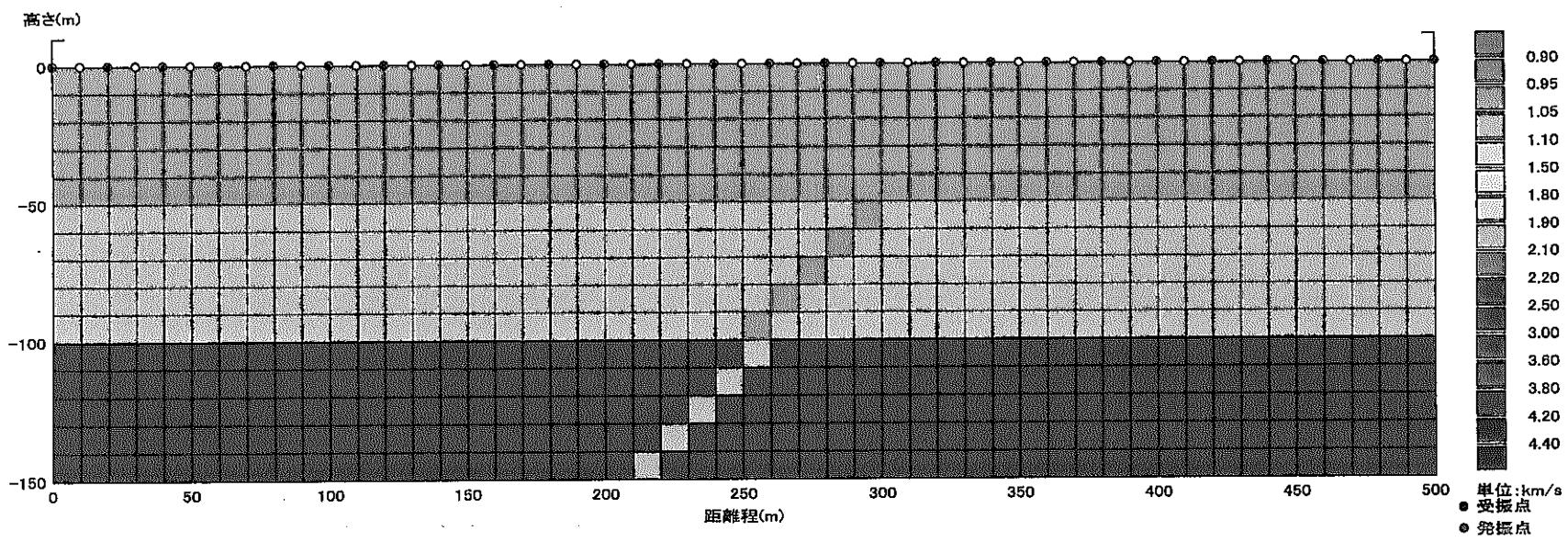
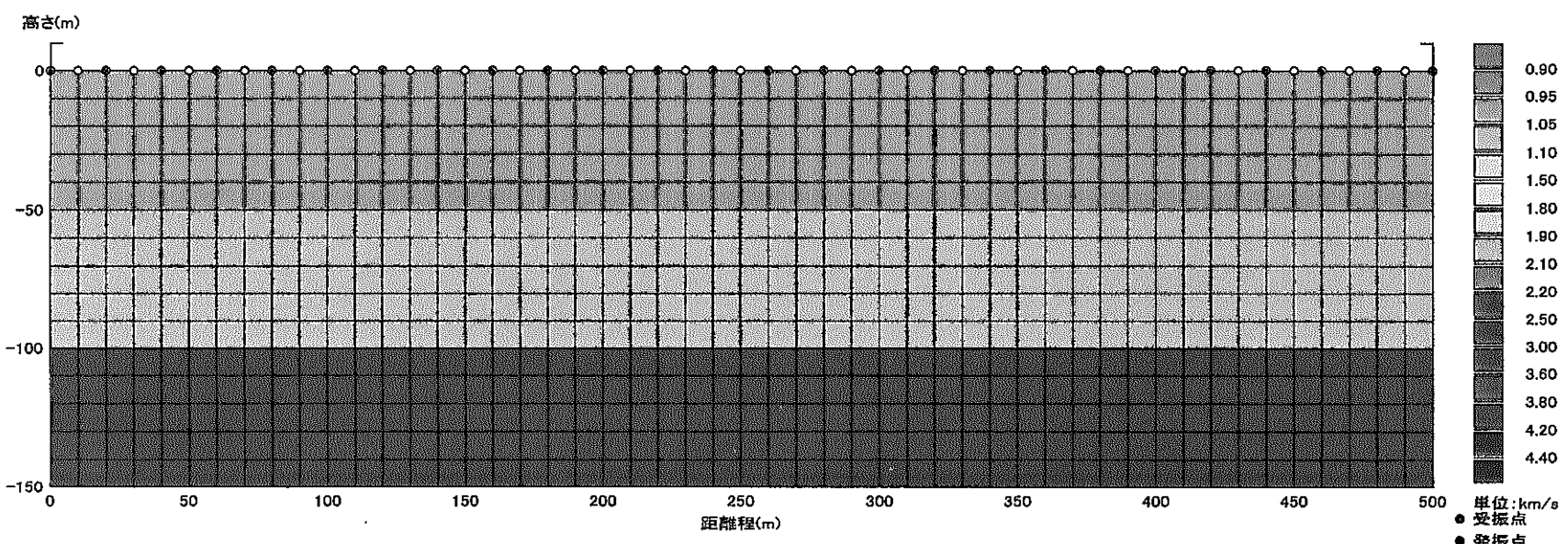


図 2.5-9 ケース 9 のモデル解析結果

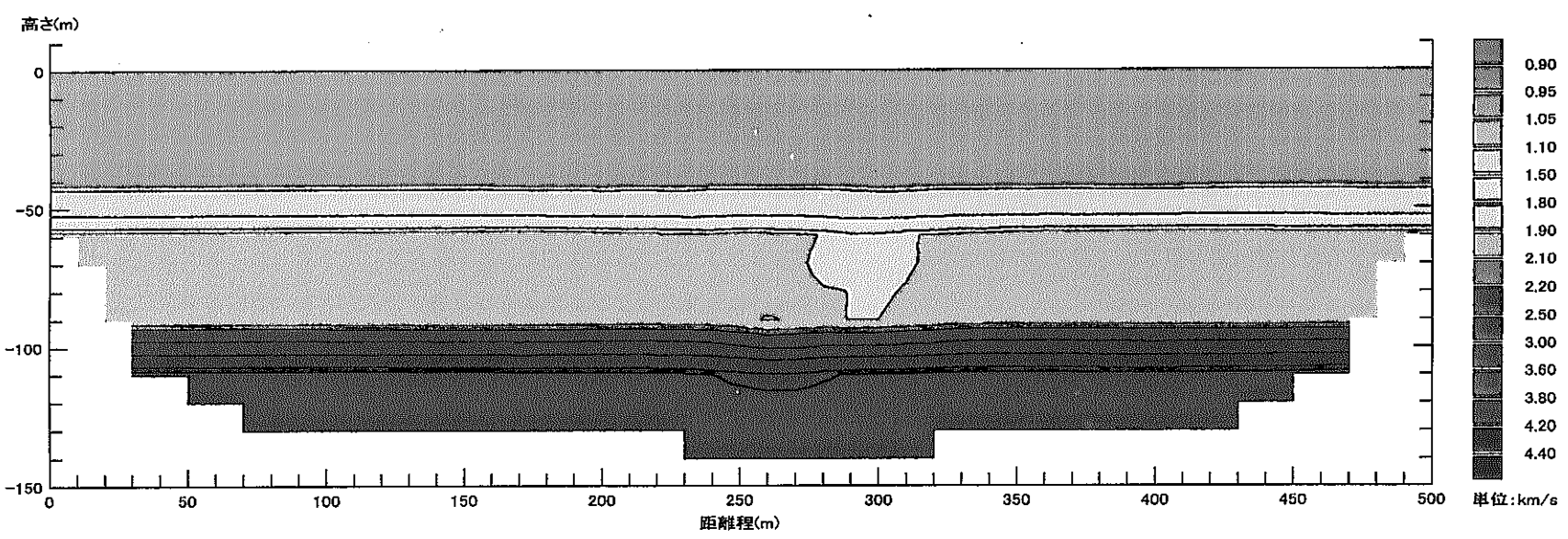
D)低速度帯モデル(観測走時算出モデル)



②インバージョン解析時の初期モデル



③インバージョン解析結果(速度分布図)



④インバージョン解析結果(波線図)

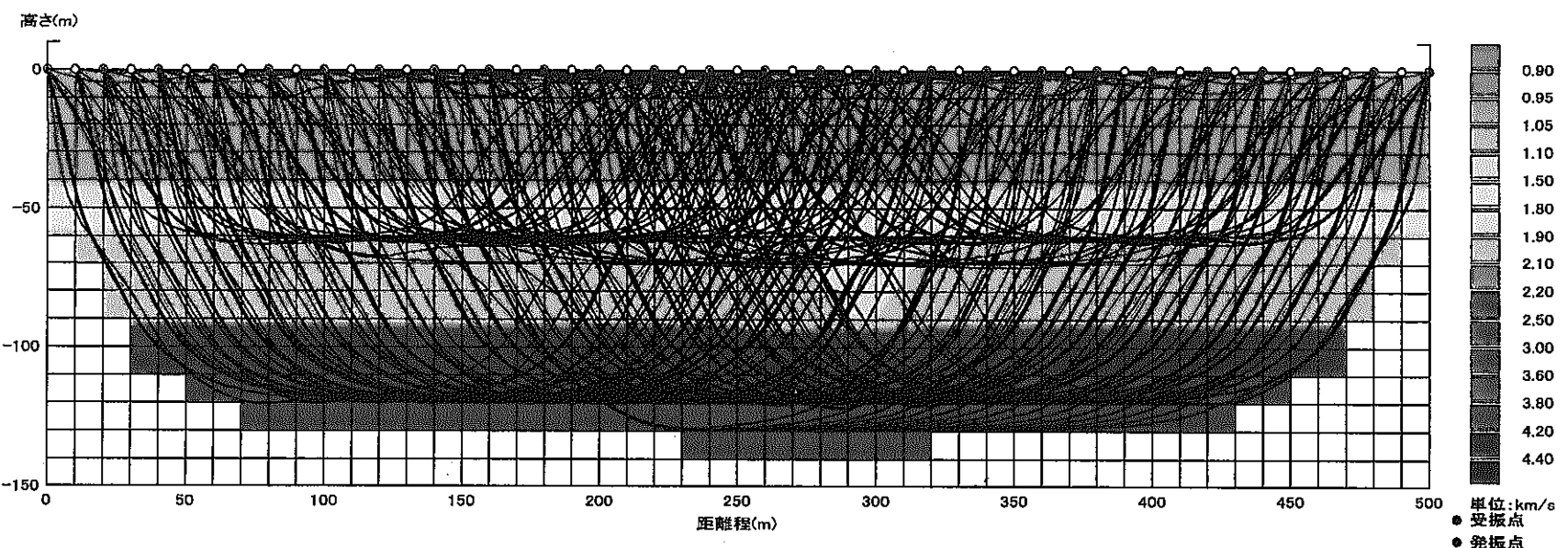


図 2.5-10 ケース 10 のモデル解析結果

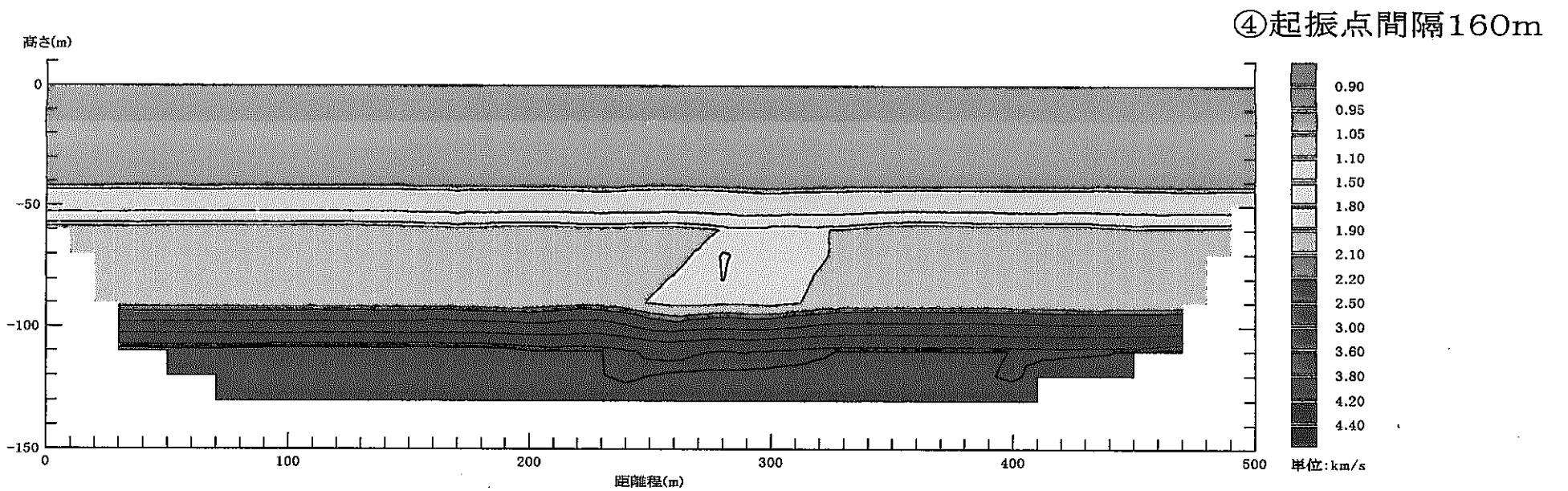
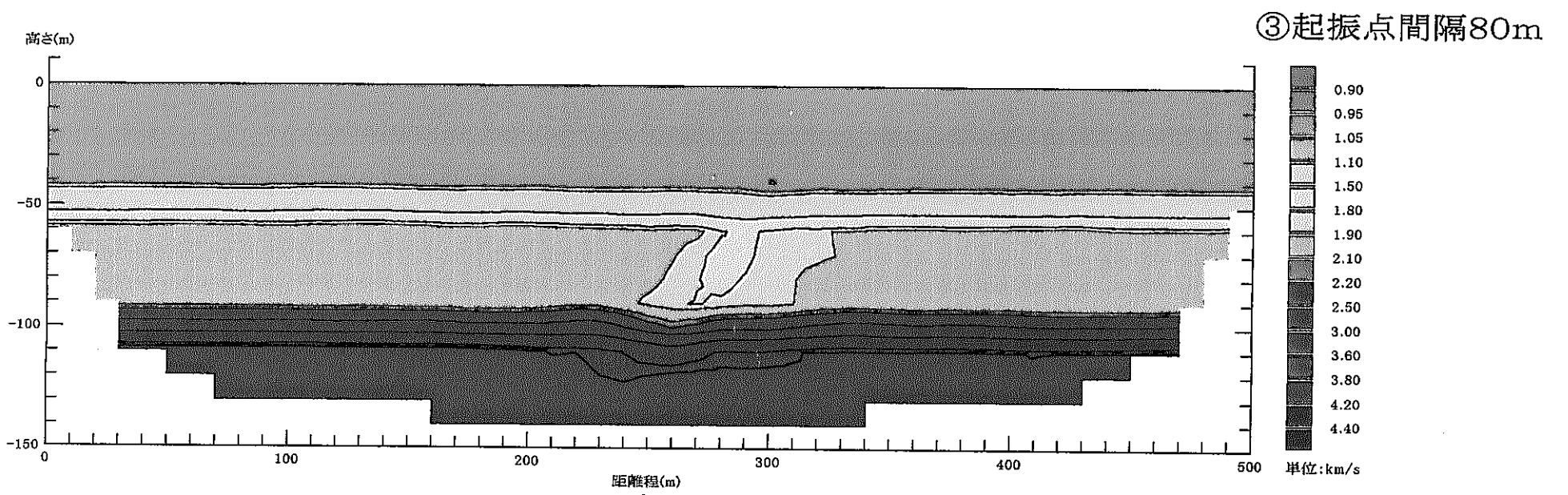
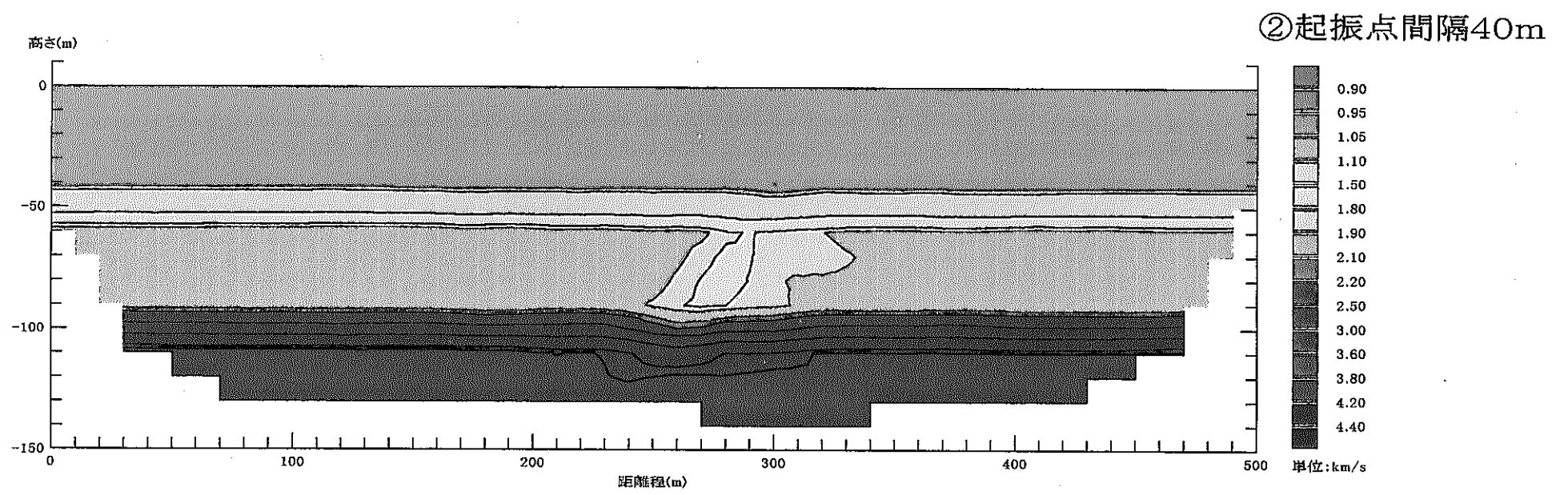
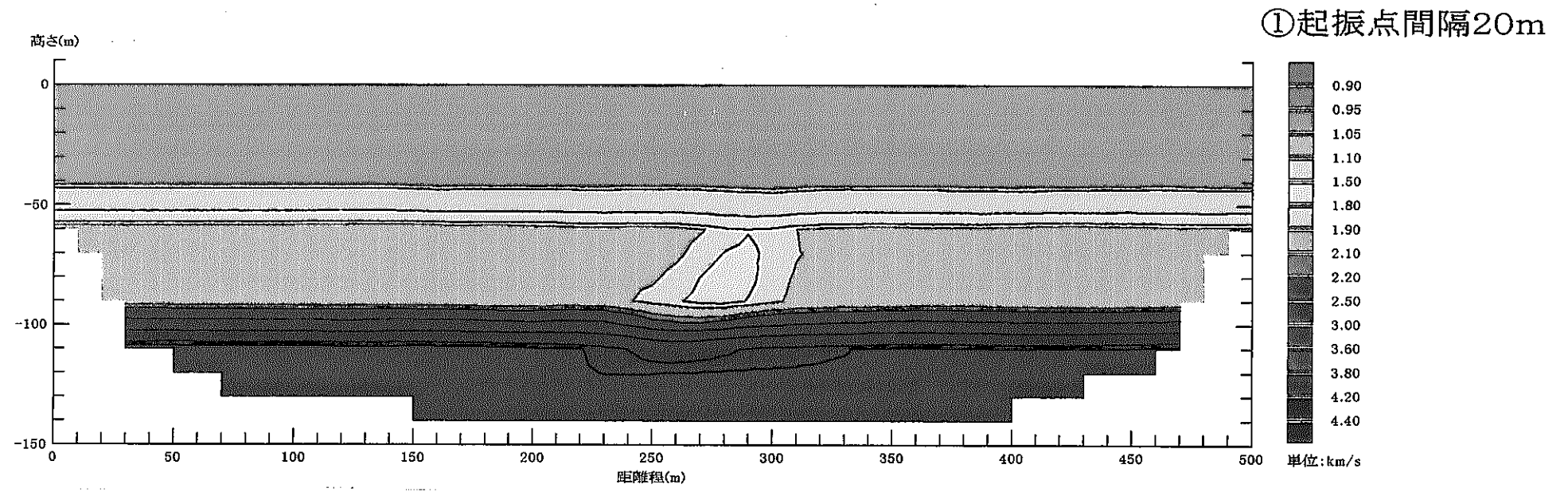


図 2.5-11 起振点間隔の違いによるモデル解析結果①(速度分布図)

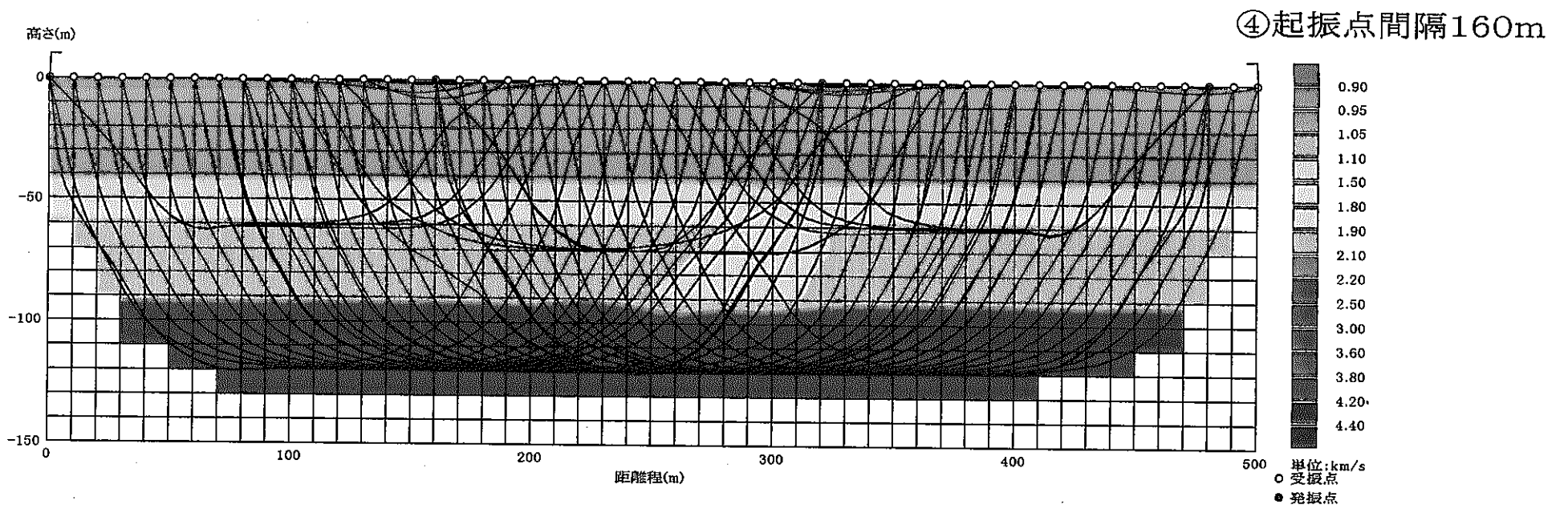
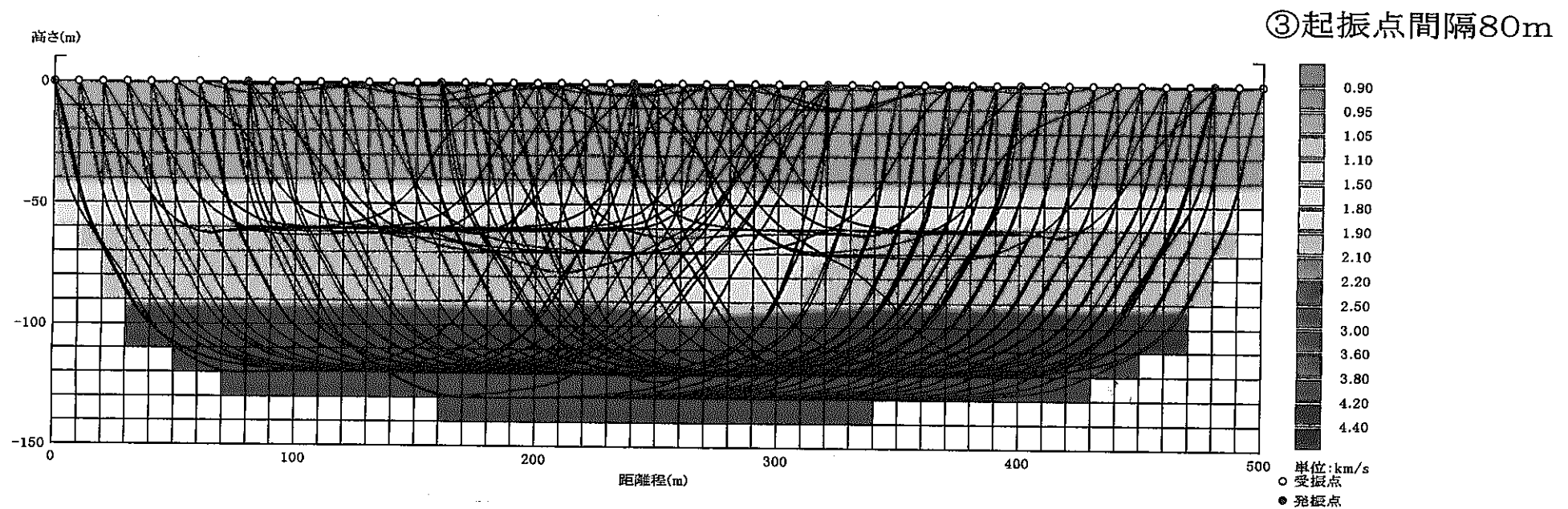
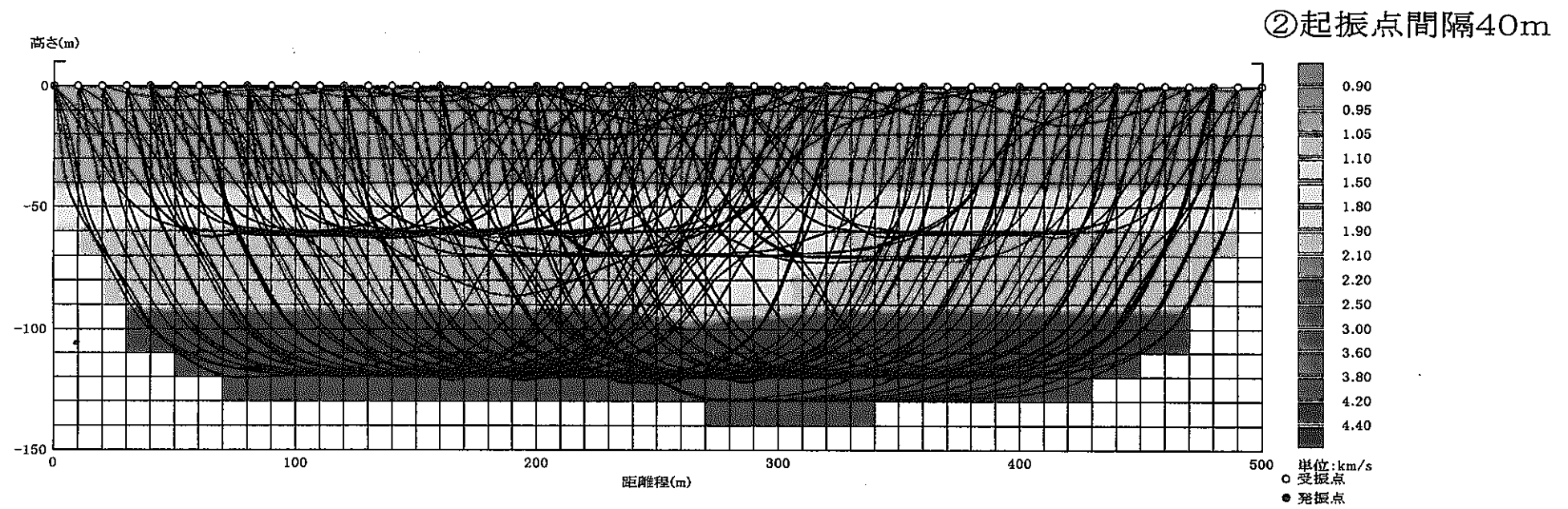
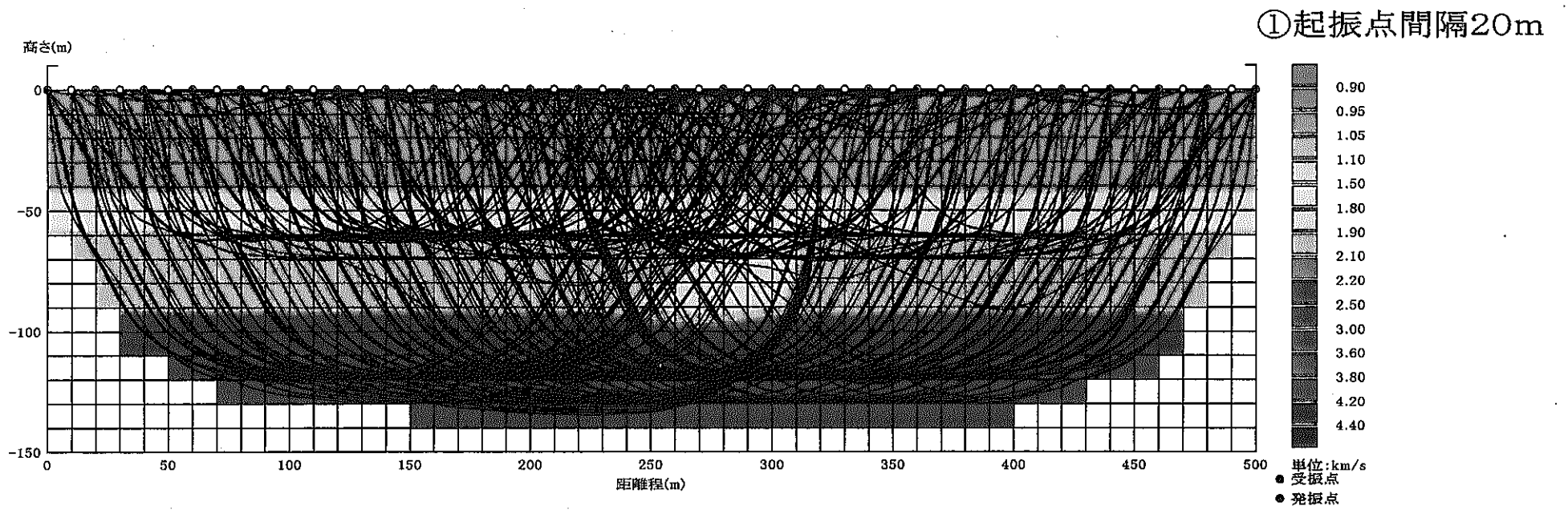


図 2.5-12 起振点間隔の違いによるモデル解析結果②(波線図)

2. 6. 考察

今回の解析業務から以下の点が明らかになった。

- ①インバージョンによる解析結果では、走時データが少ないため明瞭ではないが、どのような初期モデルで解析しても、距離程 500m 付近の谷部から基盤の距離程 500~600m 付近に、測線の終点（南側）に傾斜した低速度域が認められる。この低速度域は月吉断層の破碎部を捕捉している可能性がある。また、初期モデルの基盤に低速度帯がある場合でもない場合でも、インバージョン結果としては同程度に収束した解を得ることができるが、基盤内の低速度域に関しては今回の走時データ量では、初期モデルを反映した結果となる。
- ②萩原の方法では、低速度帯のある・なしに係わらず、速度層区分の基となる回帰直線の選択には、統計的に問題はない。言い換えると萩原の方法では、低速度帯の設定には解析者の主観による差異が生じやすい特性があると言える。
- ③萩原の方法とインバージョン法の両者の精度的な違いを定量的に述べるのは難しいが、萩原の方法では、各速度層の上面深度以上の層厚を持った均質な速度層が層状に分布する場合は有利であり、インバージョン法では、速度層境界での速度変化が急激でなく、速度が徐々に変化したり、同一地層内に速度の不均質が存在する場合に有利であると言える。実際に存在する地質構造は、多くの場合、不均質と仮定できるので、基本的にインバージョン法を用い、走時曲線で明らかな速度急変部が存在する場合には初期モデルに萩原の方法による結果を使用し、それ以外の場合には均一速度初期モデルを使用することが屈折法による弾性波探査解析において有効であると考えられる。このように初期モデルを選択することによって、解析結果としての速度分布の信頼性を一層向上させることができる。
- ④既存初動走時の再解析や感度解析結果から、断層破碎帯幅が断層上面深度の 1/5 程度以上で、断層破碎帯速度が周囲の速度の 1/2 以下であれば、断層面を境界とした地層のずれが大きくなるとも、断層位置やその傾きを検知できる可能性がある。また、月吉断層を対象とする場合、基盤（土岐花崗岩）までの深度は 100~150m 程度と見積もられる。その場合、中間層（瑞浪層群）も含む領域の弾性波速度分布を屈折法で求めるには、測線長：500m 以上、起振点間隔：80m 以下、受振点間隔：10m、最大波形到達距離：500m 以上の測定が必要と考えられる。現実的には、地表付近の土中発破での最大波形到達距離は 200~300m 程度であるので、孔内または水中起振する必要があると考えられる。

⑤全波形解析（フルウェーブトモグラフィ）については、物理探査学会発行の物理探査ハンドブックの750ページや787ページによると、「例えば、「トモグラフィ型の人工地震波を、波形フィッティングによるインバージョン法で解析する手法」（土家輝光,1997、フルウェーブ・トモグラフィの解析法、物理探査、50、444-459）と定義されており、P波速度やS波速度、減衰定数、密度等の各物性値をインバージョンによって求める解析手法であるが、パラメータが多い分、非常に非線形性が強いため発展途上の技術であるが、今後の期待は大きい。」とある。今後屈折法弾性波探査解析においても実用化されれば、より高い精度保証が期待できると考えられる。

3. 結論

本業務によって得られた成果について以下に述べる。

- ①月吉断層規模の地質構造について、通常の屈折法で用いられる萩原の方法で解析した場合と、より新しい技術で解析した場合とで、解析精度の違いの有無を確認したが、断層調査への適用性を把握するという目的に対しては、既存データ量がインバージョン法を評価するには少ないなどの問題は残った。
- ②一般的に、萩原の方法では、各速度層の上面深度以上の層厚を持った均質な速度層が層状に分布する場合が有利であり、インバージョン法では、速度層境界での速度変化が急激でなく、速度が徐々に変化したり、同一地層内に速度の不均質が存在する場合に有利であると言える。現実存在する地質状況を勘案すると、均質な速度層というものは考え難く、今後の屈折法弾性波探査に関しては、インバージョン法を有効に利用して行くべきであると考えられる。
- ③屈折法弾性波探査の走時の取り方を、統計的（定量的）に整理して、従来法での速度層区分の品質保証資料の作成を試みた結果、インバージョン技術を応用した解析と品質面での比較を行うと、従来のハギトリ法に関しては層数や各層の速度値を決める場合の解析者の主観による差異が生じやすい特性が残ることや、インバージョン法においては、初期モデルに低速度帯がある場合でもない場合でも結果的には同程度に収束した解を得ること、基盤の低速度帯に関して今回の走時データ量では初期モデルを反映した結果となることなどが判った。
- ④実際に存在する地質構造は、多くの場合不均質と仮定できるので、基本的にインバージョン法を用い、走時曲線で明らかな速度急変部が存在する場合には初期モデルに萩原の方法による結果を使用し、それ以外の場合には均一速度初期モデルを使用することが屈折法弾性波探査解析において有効であると考えられる。
- ⑤月吉断層の物理的性質をパラメータとした感度解析結果から、断層の検出を目的とした場合の適切な調査計画について整理すると、中間層（瑞浪層群）も含む領域の弾性波速度分布を屈折法で求めるには、測線長：500m 以上、起振点間隔：80m 以下、受振点間隔：10m、最大波形到達距離：500m 以上の測定が必要であるという結果が得られた。インバージョン解析を用いて従来の探査結果を再解析したことで、適切な調査計画を立案できた。

最後に、萩原の方法とインバージョン法とでは、観測走時と理論走時との全体的な誤差がそれほど変わらないが、インバージョン法は断層の幅や傾き等の詳細な地質構造を把握できる可能性があるという結果が得られた。インバージョン法の中で今回用いた手法では、その連続体を仮定した解析原理からして、急激な速度境界面の解析には不向きであるので、物理探査における屈折法探査としては、萩原の方法も初期モデル作成に利用するなどして、インバージョン法と併用して行く必要があると考えられる。また、地質技術者が屈折法の解析断面図を地質構造解釈する場合に、今までの萩原の方法で3～4層程度に解釈された図に対しては慣れているが、今回のインバージョン法で得られる多層速度構造に対しては、地質パターンと速度構造とを対応付けるため、経験を積み重ねる必要があると考えられる。

以 上

謝 辞

本報告書をまとめるにあたっては、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター地層科学研究グループの関係各位に、貴重なご意見等を頂き、大変お世話になった。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構報告書番号:TJ7308 94-007 東濃地域を対象にした屈折法弾性波探査による地質構造調査(その1) (1994)
- 2) 核燃料サイクル機構報告書番号:TJ7449 90-001 立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査 (I) (1990)
- 3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック (1999)
- 4) 吉中ほか：岩盤分類とその適用、土木工学社 (1989)
- 5) 基礎地盤コンサルタンツ(株)：高密度弾性波探査技術資料