

地下構造モデル作成の考え方

平成29年(2017年) 4月27日
地震調査研究推進本部 地震調査委員会

1. 地下構造モデルの構築

地震調査研究推進本部は、地震防災対策の一つとして地震動ハザードを評価するため、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ¹）」を用いて全国的な地震動予測地図を公表している。

この「レシピ」に基づき、地震動評価を行うための地下構造モデルを、成層構造を前提とし、各層の密度、P波・S波速度、Q値および層境界面の形状などを主なパラメータとする三次元速度構造として定義し、工学的基盤²と地震基盤³の各上面を境界とする以下の3つの領域に分けて、地下構造モデルを作成する。

- ・浅部地盤構造：工学的基盤の目安である300～700m/sのS波速度を示す層の上面から地表までの地盤構造。深さは0～数10m。主として、地震波の周期2秒未満の短周期成分の増幅に影響する。
- ・深部地盤構造：地震基盤の目安である3km/s程度のS波速度を示す層の上面から工学的基盤上面までの地盤構造。深さは数10～3000m程度。周期2秒以上の長周期成分も含め、広帯域地震動評価で対象となる全周期帯（0.1～10秒）の地震波の増幅に影響する。
- ・地震基盤以深の地殻構造：地震基盤上面より深い地殻構造。地震波の伝播経路特性に影響する。震央距離によっては、地震波は上部マントルまで伝播するため、上部マントルまでを含めてモデル化するが、ここでは地殻構造と記す。

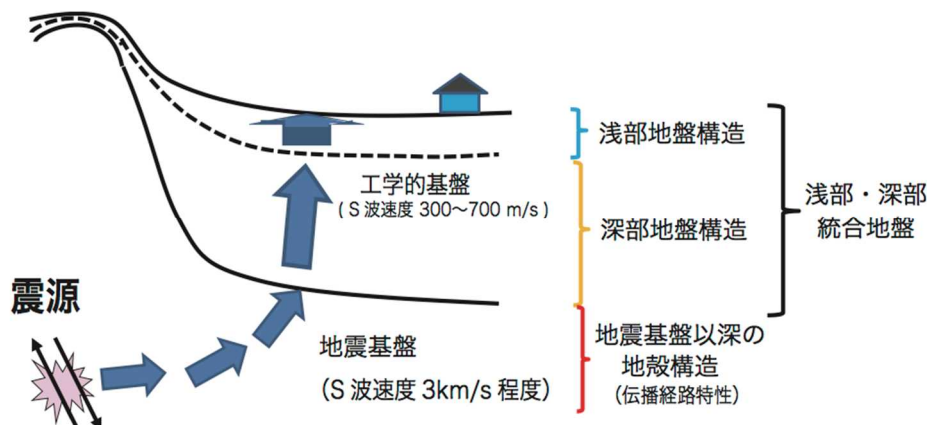


図1-1 地下構造モデルの模式図

地下構造に対する地震波の増幅特性を考慮し、震源断層から工学的基盤上面までの地下構造モデルを用いて周期2秒までの地震動のシミュレーションを行い工学的基盤上面での地震動を評価し、これに、浅部地盤構造による増幅効果を加えることで地表での地震動を得ている（ハイブリッド合成法）。なお、現在公表している「全国1次地下構造モデル（暫定版）」では、工学的基盤上面を概ねS波速度を500～600m/sの位置に設定している。より短周期側のスペクトルや地震動波形の評価を行うためには、工学的基盤上面をより浅い位置（より小さなS波速度）に設定する必要がある。また、現状の地震動評価で一般的に用いられている長周期・短周期地震動の接続周期帯（0.5～2秒）の地震動には、浅部と深部地盤構造の両方が影響すると考えられる。したがって、浅部と深部の地盤構造モデルを切れ目なくスムーズに接合する必要がある。

¹ 「レシピ」で地下構造モデル作成の考え方が公開され、これに基づく広域地盤構造モデルは、J-SHISで公開されている。地下構造モデル作成のこれまでの推移については付録1を参照（以下、付録参照は肩付き文字で示す）。

² 建築や土木等の工学分野での構造物設計の際には、地震動設定の基礎とする堅固な地盤。構造物の種類や地盤の状況によって目安とするS波速度は異なるが、多くの場合300～700m/sとされている^{付2}。

³ 地殻最上部にあるS波速度3km/s程度（以上）の堅硬な岩盤（日本建築学会, 2009）。

今回、ボーリングデータを含めた多数の地盤データを用いて浅部地盤構造モデルの高度化を行い、S波速度300m/s程度の地層上面を工学的基盤上面として設定し、水平方向には数百mの分解能を持つモデルを作成した。「浅部・深部統合地盤構造モデル」は、高度化した浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルを工学的基盤上面の深さ分布を考慮して統合したものであり、ハイブリッド合成法による周期0.1～10秒の広帯域地震動評価や、より地表面に近い深さに設定された工学的基盤上面（解放工学的基盤）での地震動評価への活用を目的としている。

図1-2に、地下構造モデル作成の流れと各手順の詳細を記した章を示す。2章で地震基盤以深の地殻構造、3章で工学的基盤以深の深部地盤構造のモデル化について紹介する。4章では浅部地盤構造モデル作成の詳細手順を、5章に広帯域地震動の評価を目的とする「浅部・深部統合地盤構造モデル」の作成法を説明する。

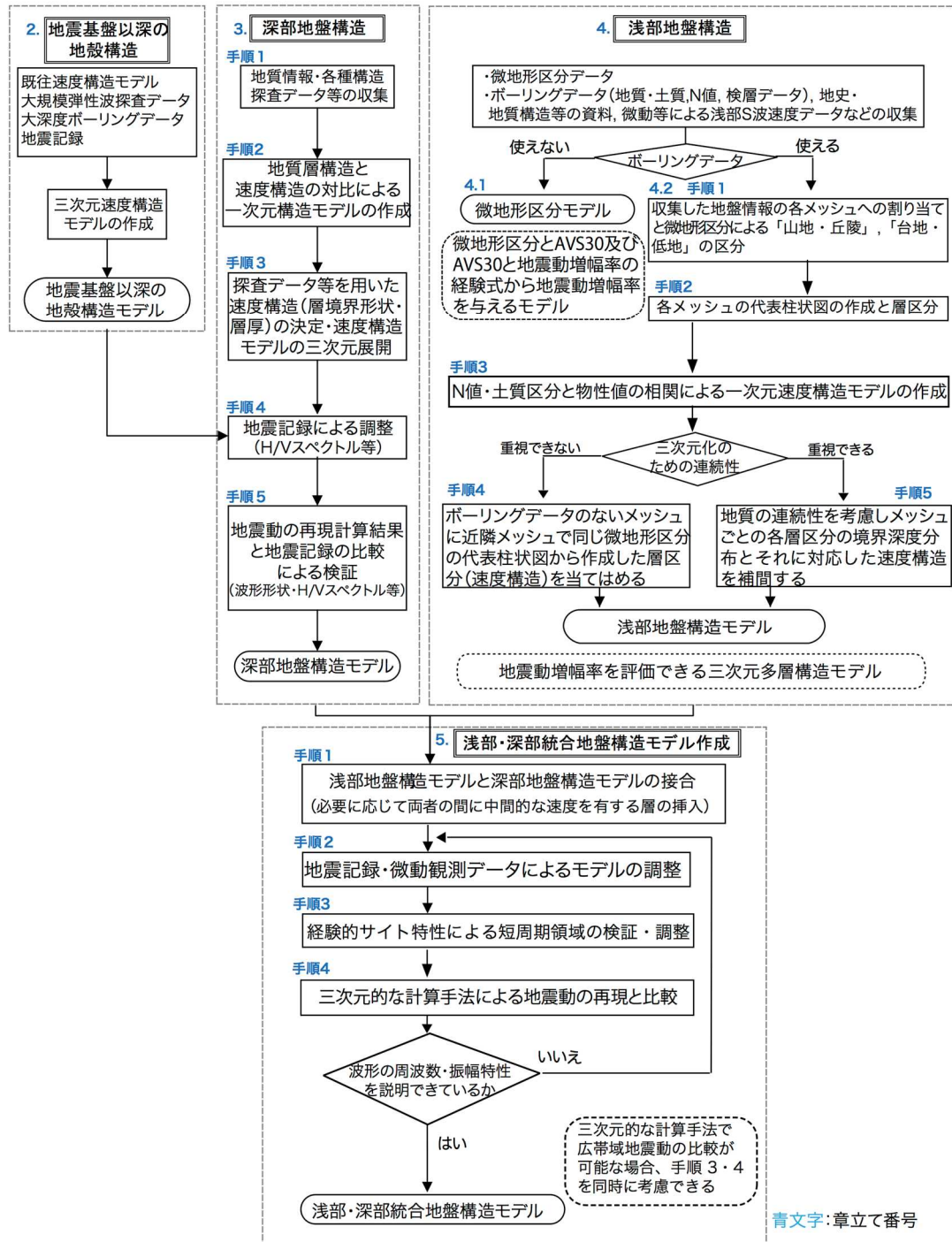


図1-2 広帯域地震動評価を対象とした地下構造モデル

2. 「地震基盤以深の地殻構造」

地震基盤以深の地下構造は、反射法・屈折法地震探査^{付3}や自然地震の走時を用いた地震波速度推定、基礎試錐等の大深度ボーリング調査^{付4}による物性値が直接的情報になる。物性値からみた地震基盤としての条件を踏まえ、広い地域でS波速度3km/s以上を有することが確認できる層に着目して地震基盤上面を定め、その深度と重力異常値の関係を抽出し、重力異常値から求められた広域の地震基盤上面深度分布を補間データとして用いる。地震探査などで求められたコンラッド面（上部・下部地殻境界面）とモホ面をモデル化する。これらの形状も重力異常分布から広域的に推定された結果を用いる。

間接的情報として、震源決定・震源インバージョン解析に使われている地殻モデル、三次元地震波速度構造（トモグラフィモデル）などを用いる。参照するモデルのS波速度も考慮し、直接的情報から求めた地震基盤深度や速度構造を補間し、地震基盤以深の三次元速度構造モデルを構築する。海域の地下構造モデルが必要な場合には、海域での地震探査や微小地震の震源分布から推定される海洋プレートの位置や形状も考慮する。マントルウェッジやスラブなどの複雑な速度情報を取り入れる場合、トモグラフィモデルの利用は有効な手段となる。

「全国1次地下構造モデル（暫定版）」では、地震基盤上面設定にあたっては、ボーリングや物理探査のデータに加えて、重力異常値の分布パターンと概ね整合するようにし、プレート上面深度として、Sato et al. (2005)や馬場・他 (2006) などを取り込み、既往研究（例えば、領木,1999; Matsubara et al., 2008）を比較・参照して地震基盤以深の地殻モデルを作成した。J-SHISで公開されている地殻構造では、Matsubara et al. (2008; 2011)によるトモグラフィモデル（防災科学技術研究所HPで公開）を用い、南西諸島地域は、Zhao et al. (1994)のコンラッド面とモホ面を参考にモデル化を行っている。情報が古い面もあるが、東京大学地震研究所HP「刊行物・データベース」に日本列島下のトモグラフィモデル例がまとめて紹介されている。

日本全国の重力（異常）値に関しては、産業技術総合研究所地質調査総合センターから日本重力測定値（2013年発行の日本重力データベースDVD版がダウンロード可能）や金沢大学のデータベース（本多・他, 2012）で数値データが公開されている。産業技術総合研究所の重力データベース（GALILEO）では、ユーザーが指定して作画した結果を閲覧できる。

3. 「深部地盤構造」

手順(1) 地質情報および各種構造探査データ等の収集

広域地質図、地質断面図等の既往資料、PS検層^{付5}を含めた大深度ボーリング調査（深層観測井）などで得られた地盤構造に関する情報、各種物理探査（反射法・屈折法地震探査、微動探査、重力探査、電磁探査法等）や自然地震などを用いた既往調査研究結果を収集し整理する。

深部地盤構造に関する情報を含む物理探査や深層ボーリング調査は、地震防災などのための基礎的な学術調査として大規模な調査も実施されている。深部地盤の基礎資料となるこれらのデータは、防災科学技術研究所（地盤データベース）・産業技術総合研究所（研究情報公開データベース）をはじめ、自然災害に対する防災情報としての利用など公共目的においては、石油天然ガス・金属鉱物資源機構による基礎物理探査や基礎試錐の調査結果なども利用可能である。

手順(2) 地質層構造と速度構造の対比による一次元構造モデル⁴の作成

既往の地質図・地質柱状図・ボーリングデータ（特に深層観測井）・周辺地質層序などを整理し、複数の地層（地質区分）からなる一次元モデル（地質層構造モデル）を作成する。それらに対応する速度構造モデルを各種構造探査で得られるP波速度等の物性値と地質の対比により作成する。データが不足している、もしくは地質情報しかないなどの場合、地質情報から地質区分を推定して地質層構造モデルを作成し、既往研究やボーリングデータのある地域で作成した地質区分と物性値の対比関

⁴ 「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レンピ）」の0次モデル（藤原・他, 2006）に相当する。

係から（例えば、鈴木, 1996）、基準となる地質区分とそれに対応する速度区分を明らかにする。

地質層構造モデルに対応する一次元構造モデルを作成するため、PS検層によるS波速度、密度検層による密度、微動探査、自然地震等を用いた構造解析などの結果を参照し、P波速度構造に対応するS波速度・密度・Q値を決定する。P波速度しか得られない場合は、P波速度から物性値を推定する理論式や回帰式を用いてS波速度、密度、Q値を求める。

物性値相互の関連を取り扱う理論式としてGassmann (1951)がある。P波速度と間隙率を与えるとS波速度、密度を推定することができる。その他、P波速度 (V_p) からの密度 (ρ) への変換には、Ludwig et al. (1970) などの速度と密度の比較研究や、経験式 $\rho = 0.31 V_p^{0.25}$ (Gardner et al., 1974) などがある。これらの理論式や変換式を用いる場合、これらを作成した元データを参照し、適用範囲を確認することが重要である。

Q値については後述する調整もあるため、この段階ではS波速度に比例する値など単純な設定でも良い。

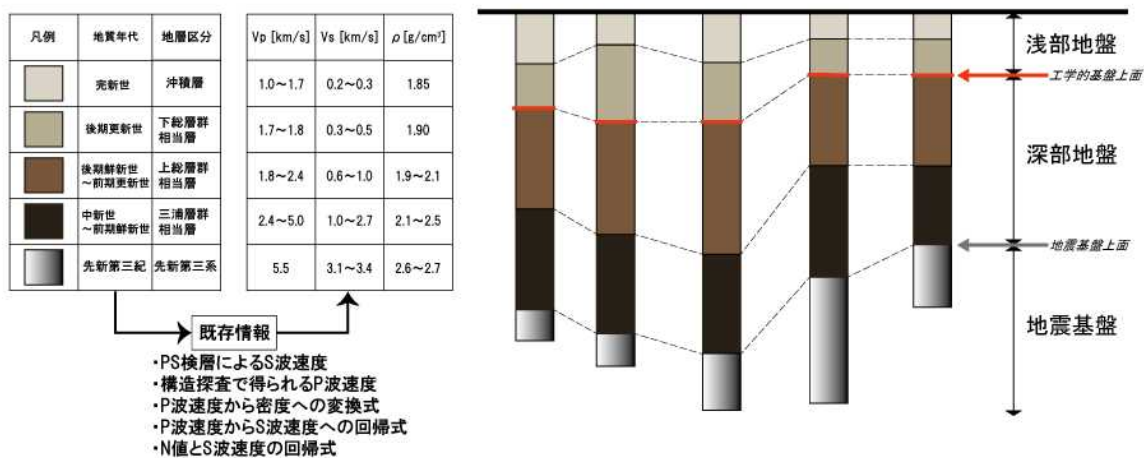


図3-1 地質層構造と速度構造の対比による一次元構造モデルの作成

手順(3) 探査データ等を用いたモデルの三次元展開

手順(2)で作成した地域（メッシュ）ごとの一次元速度構造モデルを三次元速度構造モデルに展開するために、共通した層分けを行い各層の地質（速度）と層厚を設定する。各層の面的広がり、反射法・屈折法探査によって検出される地震波速度境界面や、重力異常分布図のうち対象とする構造の深さに対応する波長成分の重力異常分布から推定される地質構造の面的広がり、既存の地質断面図、地質コンター図、地層年代、断層や褶曲の形状を考慮して空間補間する。各地質境界面の三次元分布を参照しつつ、工学的基盤上面から地震基盤上面までの深部地盤の初期モデルを作成する。工学的基盤上面としては、工学的基盤相当のS波速度を有する地層を採用し、地震基盤がごく浅い地域には必要に応じて地表付近に風化層を設定するなどの調整を行う。

各層の最終的な形状は、例えば、重力異常の理論値と観測値の比較やインバージョンによる修正を行って求めることが望ましい。

重力異常と地質構造の関係については、「日本列島の地殻変動-新しい見方から-」（木村, 2002）で細部にわたり議論されており、「100万分の1重力異常図」（河野・古瀬, 1989）、「日本列島重力アトラス」（山本・志知, 2004）などでも地質構造調査の有用性が述べられている。

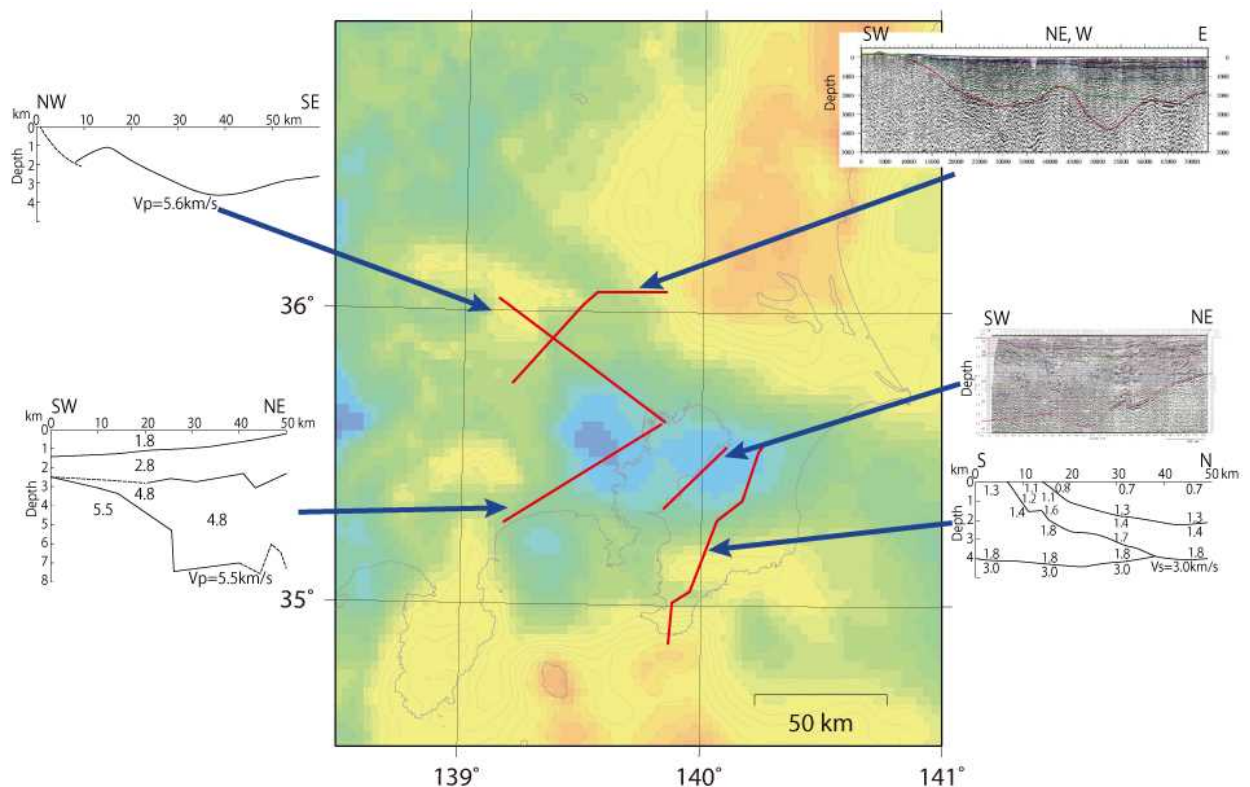


図3-2 作成した一次元速度構造モデルを面的に展開するために参考となるデータ例。

赤線は地震探査測線で、反射法で得られたP波速度断面図と屈折法で得られた地震波速度境界面の例を示している。カラーコンターは重力異常値（地質調査総合センター（2013）のブーゲー異常。仮定密度は 2.0g/cm^3 ）を示す。これらの情報を補間情報として、面的に層境界面を展開する。

手順(4) 地震記録によるモデルの調整⁵

自然地震による地震記録を用いて、表面波の分散性やスペクトル比、レシーバー関数等から深部地盤のS波速度や境界面の深さを推定することができる。これらの解析結果から推定した構造と手順(3)で作成した深部地盤構造モデルとの直接比較や、作成したモデルを用いて計算した理論値から観測値が説明できるかなどを確認し、必要によってモデルを調整する。

地震記録を用いた地下構造の解析手法として、速度境界層の検出と観測点直下の一次元S波速度構造の推定を行うことのできるレシーバー関数法（Langston, 1979など）、レイリー波（基本モード）の水平成分と上下成分のスペクトル比（H/Vスペクトル）を用いた層厚とS波速度を推定する方法（例えば、Arai・Tokimatsu, 2004）がある。

日本列島に密に設置された強震観測網（防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netなど）の公開されているデータが自然地震による記録として入手しやすい。その他、気象庁などによる震度計のデータも気象庁HPやCD-ROMで公開されている。

⁵ 調整されたモデルは「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシビ）」の0.5次モデル（藤原・他, 2009）に相当する。

手順(5) 地震動の再現計算による速度構造モデルの検証⁶

作成した深部地盤の三次元構造モデルを用いて地震観測記録が得られている地点での地震動のシミュレーションを行う。差分法など弾性波動論に基づく計算手法による計算波形と観測波形を比較し、振幅や顕著な位相、増幅特性や卓越周期等が再現出来ているかを確認する。再現性を高めるために、モデルを調整することも出来る（モデルのチューニング）。インバージョンにより速度やQ値などの調整を行う方が望ましい。

地震動の評価のためには、振幅・卓越周期・顕著な位相の到着時間・経時特性などの観測波形の特徴を再現する必要がある。従って、各地層の減衰を示すQ値の設定は重要なファクターとなる。精度の高いQ値モデルを構築するには、地盤の不均質性および地域性（地質区分）などの指標を、地下構造モデルを作成する地域ごとに検討する必要がある^{付7}。観測波形を用いたインバージョンによる調整は、計算対象とする領域とリソースの量などを考慮すると出来ない場合も多いため、必ずしも必要としないが、観測波形の再現性は下がることが多い。

深部地盤構造モデルだけを用いて地震動計算を行う場合、手順(5)によりモデルを完成させる必要があるが、浅部と深部の地盤構造モデルを統合化する場合、地震記録による検証とチューニングは、統合したモデルについて行うことが望ましい。

4. 「浅部地盤構造」

地震動の短周期部分（周期2秒未満）の増幅には、工学的基盤以浅から地表までの浅部地盤のS波速度構造が大きく寄与する。浅部地盤構造のモデル化は表層地質データや地盤調査に利用されているボーリングデータを収集して地盤応答計算用の一次元多層速度構造モデルを作成するのが基本になる。しかし、浅部地盤構造は、局所的に大きく変化することが稀ではなく、それらの変化を反映したモデル化を行うためには、多量のボーリングデータを必要とする。また、ボーリングデータから作成した一次元構造を結合して三次元化する場合、単に数学的な補間を行うのではなく、補間情報として地質の連続性を考慮したり、微動観測によるS波速度の推定によるチューニングなどを行うことが望ましい。現実的には、利用可能なボーリング情報がほとんど存在しない地域も多く、どこまで局所的な変化の反映や三次元的な連続性を重視するかは再現したい地震波の周波数領域、ボーリングデータやその他の地質構造情報などのデータ量、計算機等のリソースの種類・量によって決まる。

ここでは、微地形区分により浅部地盤を評価する微地形区分モデルと、ボーリングデータを活用するモデル化手法を説明する。ボーリングデータを活用するモデル化では、ボーリングデータのない地点についての補間法として微地形区分を活用した補間方法と、浅部・深部統合地盤構造モデルの作成に用いている地質の三次元的な連続性を重視した詳細な手法を説明する。

4.1 微地形区分によるモデル化の方法

微地形区分モデル

既存の地形・地盤分類図などの縮尺を考慮した適当な大きさのメッシュに分け、メッシュ内に複数の微地形が存在する場合は、メッシュ内に最も広い面積を占める微地形やメッシュ中央点の微地形をメッシュの区分として代表させる。各メッシュの代表地形・微地形を統一した分類基準によって再評価し、地形区分を行ったメッシュマップに対し、標高、傾斜、古い時代に形成された山地・丘陵からの距離などを説明変数として経験的に地盤増幅特性を推定する。

地盤増幅と相関の高いAVS30（地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度）を、PS検層データを基にした経験式によって推定し^{付8}、AVS30と最大速度などの地盤増幅度の関係から各微地形区分での浅部地盤での増幅率を計算する。地盤データが十分でない場合など、日本全国広範囲での地盤増幅特性の評価に用いることができる。

⁶ 調整されたモデルは「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）」の1次モデル^{付6}に相当する。

既存の微地形区分モデルとして「地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ」（松岡・若松, 2008）がある。これは「地形・地盤分類250mメッシュマップ」（若松・松岡, 2003）の微地形区分に対し、経験式（松岡・他, 2005）からAVS30を推定し、地盤増幅度と浅部地盤の平均S波速度の経験式（藤本・翠川, 2006）を用いて、AVS30を基に地盤増幅度を計算したモデルである。地形学の新たな知見に基づいて微地形区分を見直して作成された「全国統一基準による地形・地盤分類250mメッシュマップ（図4-1）」（若松・松岡, 2013）もある。

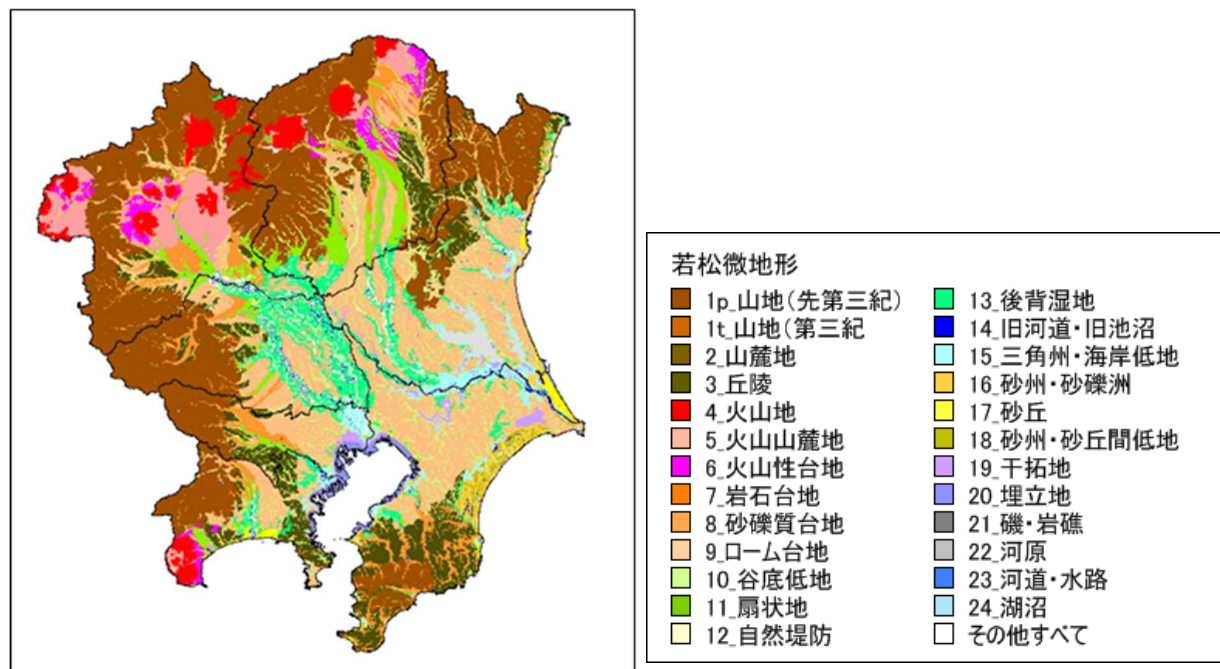


図4-1 微地形区分を見直し、世界測地系で作成された微地形区分マップ（若松・松岡, 2013）

4.2 ボーリングデータによるモデル化の方法

手順(1) 収集した各種調査データの各メッシュへの割り当てと微地形区分による「山地・丘陵」、「台地・低地」の区分

モデル化する対象地域をメッシュ分割してボーリング調査位置を記し、メッシュごとにPS検層データの有無・メッシュ内ボーリング数・掘削深度、微地形区分をまとめる。地震探査・微動探査等のボーリングを用いない物理探査が行われたメッシュも明らかにしておく。

地形学的な地形分類基準と浅部地盤特性の評価という工学的用途を考慮して作成された分類基準（若松・他, 2004）に準拠し、「山地、山麓地、丘陵、火山地、火山山麓地、火山性丘陵」に相当する地形を「山地・丘陵」、それ以外を「台地・低地」と区分する。

ボーリング情報は、自治体を含め各機関でデータ公開が試みられている（土木研究所「Kunijiban」・防災科学技術研究所「ジオ・ステーション」・産業技術総合研究所「研究情報公開データベース」・地盤工学会「全国電子地盤図」等）。

浅部地盤構造モデル作成では、深部地盤構造モデルで用いた情報に加え、電子国土基本図・基盤地図情報（国土地理院によりオンライン提供）、20万分の1 シームレス地質図等で確認できる地質情報（産業技術総合研究所により「地質図Navi」で複数の地質情報をオンライン提供）、「全国統一基準による地形・地盤分類250mメッシュマップ」（若松・松岡, 2013）などが用いられることが多い。

手順(2) 各メッシュの代表柱状図の作成と層区分

各メッシュを代表するボーリング柱状図を作成する。複数のボーリングデータがメッシュ内にある場合、最もボーリング深度の深いデータやPS検層を行っているボーリングのデータを代表的な柱状図として採用する。または、劣悪なデータを除いたメッシュ内のボーリングデータから、深度ごとに土質の最頻値と N 値⁷の平均値を求めて代表にあたる柱状図とする。このように設定したものを代表柱状図と呼ぶ。代表柱状図に対し、既往文献などに示されている地質層序、土質区分や N 値を考慮した層区分を行う。

「山地・丘陵」に属するメッシュでは、岩盤の風化、応力解放によって地表付近のS波速度が深部に比べて小さくなっていることや、ローム層等の存在を考慮し、地表から数mの深さに風化層や被覆層を設定する必要がある。代表柱状図が作成できる場合、深度方向の N 値の変化に基づいて風化層・被覆層の区分を設定する。

メッシュ内であっても、ボーリングデータの位置の違いによって、土質やその厚さ、 N 値が側方に変化している。場合によっては、微地形や地質層序の違いも認められる。土質・ N 値の変化は、メッシュの空間的広がりやを反映したものであり、それらの平均を求めて代表柱状図とする手法もある(安田・他, 2009)。また、メッシュ内のボーリングごとに微地形や地質層序、層区分に違いがある場合や層厚が大きく変化する場合は、より信頼性の高いデータのみを残して代表とするか、当該メッシュの最大面積を占める微地形や地質層序に相当するボーリングデータを採用することができる。

浅部・深部統合地盤構造モデルでは、関東地域の「山地・丘陵」部で行われたボーリングデータと、全国範囲のPS検層データを整理し、 N 値に基づいて風化層を含めた層区分(風化区分)を設定している(図4-2)。「山地・丘陵」の区分に属するメッシュに代表柱状図がある場合、「被覆層・強風化部(N 値10未満)」「弱風化部(N 値10~50未満)」「新鮮部(N 値50以上)」の3層に区分し、ボーリングデータのない場合には地層の連続性を考えて層区分している。

層区分 (V_s [m/s])	N 値
被覆層・強風化部 (150~200)	10未満
弱風化部 (200~350)	10以上 50未満
新鮮部 (工学的基盤上面速度)	50以上

図4-2 山地・丘陵地の地表付近の層区分の例

手順(3) N 値・土質区分と物性値の相関による一次元速度構造モデルの作成

手順(2)で作成した層区分に、PS検層により得られたP波・S波速度を割り当てる。PS検層データのない場合には、土質別および地質年代別の N 値と物性値(主にS波速度)の経験式を用いて各層に速度値を与え、一次元速度構造モデルをメッシュごとに作成する。

各種土質データに基づくS波速度の推定式に関しては、過去から多くの回帰式が提案されている。回帰式の説明変数として、 N 値と土質を用いる式(今井・殿内, 1982)、さらに多くの情報(N 値・土質・地質年代・深度)を用いる式(太田・後藤, 1976; 正木, 1984; 福和・他, 1999)などがある。

メッシュごとに N 値や土質などから異なる速度構造を推定するのではなく、代表柱状図に基づいて作成した層区分に対し、平均的な速度構造を与えてモデル化してもよい。浅部・深部統合地盤構造モデルでは、代表柱状図がPS検層データに基づかない場合、 N 値・土質・地質年代を説明変数とする中央防災会議(2001)の式等を参考に、土質区分ごとに回帰式を検討して、層区分ごとのS波速度を与え、「山地・丘陵」部の風化区分に対しては、図4-2に示すように、「被覆層・強風化部」と「弱風化部」のそれぞれに、150~200m/sと200~350m/sのS波速度を与え、「新鮮部」は当該地域の工学的基盤上面のS波速度を設定している。なお、中央防災会議(2001)では、風化層として第四紀火山・第三紀堆積層に対し10m、それ以外には5mの層厚を設定して、S波速度を300m/sとしている。

⁷ 地盤の強度等の指標となる数値であり、標準貫入試験サンプラーを300mm貫入するのに必要なハンマーの落下回数として定義されている。地盤の工学的性質及び試料を求めるために行う試験(標準貫入試験)によって求められる。

手順(4) ボーリングデータのないメッシュのモデル化（三次元化のための連続性を重視できない場合）

ボーリングデータのないメッシュは、そのメッシュ内で優勢な面積を持つ微地形と同じ微地形区分を持つ近傍メッシュの代表柱状図を用い、その一次元速度構造モデルを当てはめる。「台地・低地」部で同じ微地形区分に属するメッシュが周辺に複数ある場合、最も近いメッシュの速度構造モデルを当てはめる。

「山地・丘陵」に属するメッシュでも同じ微地形区分のモデルを用いるが、風化部の厚さは、表層地質により異なるため、地表付近の地質分布も考慮する。

ボーリングデータのない領域が広い場合には、同じ構造が続くことになるが、微地形区分が異なる場合、微地形区分ごとにモデル化された層構造の違いなどは反映されるため、一次元多層構造モデルに近い三次元化になる。ボーリングデータ量に応じてモデルの精度が左右されるが、モデル化が容易であるために広く利用されている手法である（図4-3の左図）。

手順(5) ボーリングデータのないメッシュのモデル化（三次元化のための連続性を重視できる場合）

手順(3)で作成した一次元速度構造モデルの各層境界面について、地形・地質の特徴を参考に各層の連続性を考慮し、ボーリングデータのないメッシュ部分の境界面をデータのある周囲のメッシュ情報に基づき内挿する。

浅部地盤を対象とした物理探査データは、重要な物性境界面を検出できるため、ボーリングデータのない箇所などでは、微動観測・物理探査の実施も重要である。微動観測によりS波速度構造を決定でき、層厚のチューニングを行うことができる。物理探査データは、一次元速度構造モデルの層境界面を水平方向へ補間（三次元化）するための面的情報にもなる。また、一次元速度構造の内挿にあたっては、各メッシュの代表柱状図で設定された層境界面の標高値を使って対象領域全体について、面モデル（surface model）としてクリギング・IDW（逆距離加重補間）・スプライン関数等を使って空間補間計算で求めることもできる。層境界面の分布範囲やその境界については、十分な考慮が必要である。例えば、沖積層分布は低地内に、ローム層分布は台地内に限られる。そのため、「山地・丘陵」と「台地・低地」の境界地域では、両地域の地質の違いにより、工学的基盤上面に著しい不整形性が生じる場合もある。採用するメッシュの大きさに対応した精度で両者の接合部分の形状を表現することに留意する。

ボーリングデータのないメッシュの各層区分の速度値の補間については、近隣メッシュの代表柱状図の該当する層区分の速度値を使って直接、速度を補間計算で求める方法と、初めに土質区分とN値を補間で求め、それらを説明変数とするS波速度への変換式を用いてS波速度値を求める方法（木村・他、2014）もある。

浅部・深部統合地盤構造モデルでは、広帯域地震動を再現するために用いることを目的とするため、この高度化した三次元化手法（図4-3の右図）で浅部地盤構造モデルを作成している。しかし、局所的な層構造境界面の変化などを正確に求めるために、ボーリングデータを大量に収集するとともに、多くの微動観測を行っている。

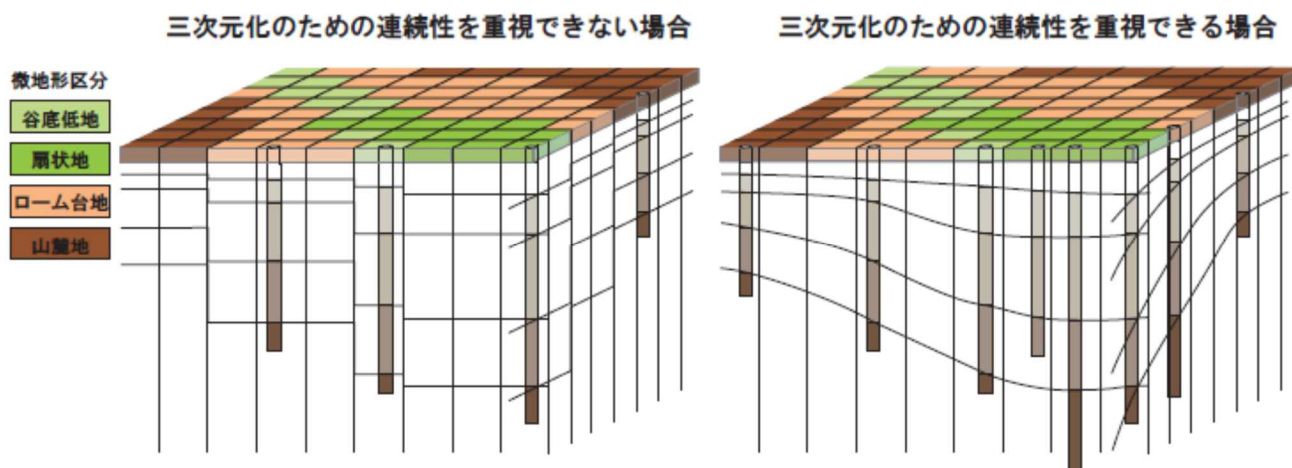


図4-3 ボーリングデータのないメッシュのモデル化の違い。

三次元化のための連続性を重視できない場合（左）は、微地形区分ごとに層境界面の深さが一定のブロック状のモデルになる。連続性を重視できる場合、データの無いメッシュ近隣のメッシュの層区分と滑らかにつなげるように面的情報も加えて考慮する。

5. 「浅部・深部統合地盤構造モデル」の作成

広帯域地震動の評価を目的とし、浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルを統合した浅部・深部統合地盤構造モデルを作成する。ここで作成するモデルは地盤の非線形性の影響を考慮しない。統合したモデルの浅部地盤部分は線形の地震動増幅の計算に用いる。なお、地盤の非線形挙動による地震動変化を考慮するには、非線形特性を仮定した地盤増幅特性の評価を行う必要がある。

ボーリングデータを基準にして浅部地盤構造をモデル化する場合、一般的に、 N 値 50 を有する地層の深さまでボーリングデータがあることが多いため、 N 値を参考にして工学的基盤面（ N 値 50、 S 波速度で 300～400m/s）を最下面として設定することができる。一方、深部地盤構造はさまざまな情報から S 波速度 500～700m/s の地層を目安として最上面が設定されていることが多い。ここでは、4 章までに作成した二つの地盤構造モデルを人為的な不連続なく接続し、地震・微動観測などを用いて調整を行うことで統合地盤構造モデルを作成する手順を説明する。

手順(1) 浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルの接続と調整

浅部地盤構造モデルの最下面での S 波速度と深部地盤構造モデルの最上面の S 波速度を比較し、両者の速度差（もしくは、インピーダンスコントラスト）が小さい場合には、浅部と深部の地盤構造モデルをそのまま接合する。両者のインピーダンスコントラストが大きい場合には、2つのモデルの間に中間的な速度（ $V_s=400\sim500\text{m/s}$ ）を有する層を設定し、接合による人為的な不連続が生じないようにする。中間的な速度を有する層の厚さと速度値は深いボーリング調査における PS 検層データ等を参考にして設定することとし、堆積盆地と周辺の山地部を含む広域的な領域における深部地盤構造モデルの最上面や地震基盤上面の深度の空間的分布傾向を考慮して、三次元的にも人為的な不連続を生じないように層厚を調整する。

浅部と深部の地盤構造モデルを接合させる境界面の三次元的な形状や層厚などに注意して中間層を設定する(図5-1)。

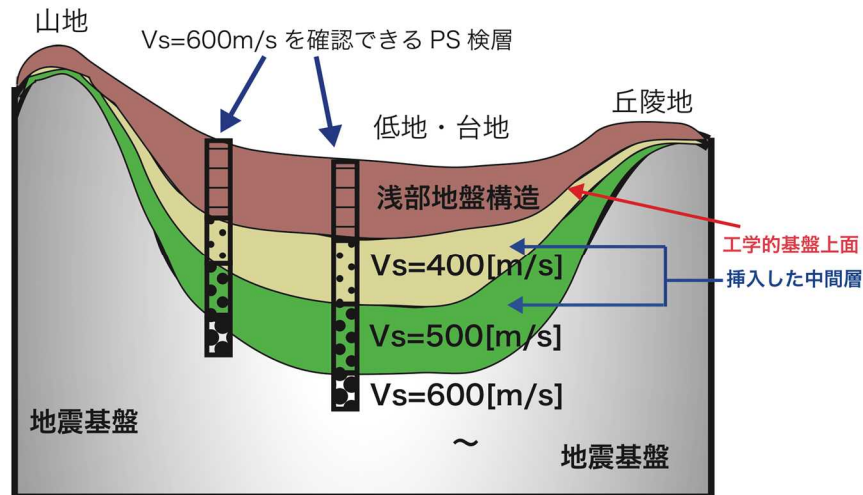


図5-1 中間的な速度の設定イメージ

工学的基盤上面や地震基盤上面の三次元的な形状を考慮し、深いボーリング調査におけるPS検層データ等を参考にして中間的な速度を有する層の厚さと速度値を設定する。

手順(2) 地震記録・微動観測データによるモデルの調整

地震記録・微動観測データを収集し、手順(1)で作成した統合地盤構造モデルを調整する。地震記録・微動から、観測点直下の地下構造情報を抽出し、モデルの調整（チューニング）を行う。モデルの調整に困難が伴う場合には、必要に応じて更なるデータ収集や微動観測を実施する。

手順(1)で挿入した中間的な速度を持つ層の層厚や速度も含めてチューニングを行い、必要があれば、接合部分から見直しを行う。

地震記録・微動観測データから地下構造の情報を抽出するために、地震記録の水平動に対する上下動のフーリエスペクトル比であるH/Vスペクトル（解析対象をレイリー波に特定し、R/Vスペクトルと表記する場合もある）、微動観測によるH/Vスペクトル、鉛直アレイを用いた地中記録に対する地表記録のスペクトル比、微動アレイ観測による位相速度情報などの解析がある。例えば、1点の微動観測によるH/Vスペクトルのピーク周期や形状からは、成層地盤を仮定した場合のレイリー波の理論H/V楕円率と比較してS波速度や層構造を決定することが可能である。微動アレイ観測記録から表面波の位相速度を求め、逆解析によりS波速度と層厚を決定する方法もよく用いられる。複数のデータを同時に逆解析する同時逆解析（ジョイント・インバージョン）もモデルのチューニングには有効な手法である。

手順(3) 経験的サイト特性による短周期領域の検証・調整

中小地震の地震観測記録から経験的手法により短周期（例えば2秒未満の周期）のサイト特性を推定し、手順(2)で調整した統合地盤構造モデルを用いて理論的手法で計算した結果と比較し、モデルの検証を行う。サイト特性の再現性に問題がある場合、手順(2)に戻りモデルの再調整を行う。

経験的な短周期のサイト特性の評価手法としては、スペクトルインバージョン（例えば、岩田・入倉, 1986）があり、地盤および伝播特性のQ値についても検討することができる（例えば、福島・翠川, 1994；山中・他, 2009）。サイト特性の理論的評価には、主に一次元重複反射理論などが用いられている。

手順(4) 三次元的な計算手法による地震動の再現と比較

手順(3)で検証もしくは調整を行ったモデルを用いて、三次元的地下構造の影響を考慮して差分法・有限要素法など弾性波動論に基づく理論的手法で中小地震の地震動を計算する。計算した波形に対応する観測波形を用いて、両者のP-S走時、振幅、ピーク周期、スペクトル形状、経時特性や継続時間など全体的な特徴を比較する。これらの再現性に問題がある場合、手順(2)に戻りモデルの再調整を行う。

地震動評価の目的に応じて、地表もしくは工学的基盤上面での比較を行う。工学的基盤上面で比較する場合には、手順(3)のモデルから浅部地盤部分を削除し、理論計算を行う。一方、観測波形に対しては、取り除いた浅部地盤構造モデルを用いた一次元地震応答計算により補正を行い、工学的基盤上面での地震動を得る。

広帯域地震動を比較する場合、弾性波動論に基づく理論的計算手法だけでなく、ハイブリッド法などが用いられている。この場合、手順(3)と(4)の検証を同時に行うことも可能である。

付録

1. 地下構造モデル作成のこれまでの推移

地震調査研究推進本部は、Koketsu et al. (2009)、藤原・他 (2009) 等を参考に、地下構造モデル作成手順をまとめ、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）」で公開し、「レシピ」に基づく広域の地盤構造モデルを、2010年に防災科学技術研究所のJ-SHISで公開した。また、「長周期地震動予測地図」（2012年試作版）において、長周期地震動予測に対応した「全国1次地下構造モデル（暫定版）」の考え方および地下構造モデルが公開されている。

2. 工学的基盤

建築や土木等の工学分野での構造物設計の際には、地震動設定の基礎とする堅固な地盤とされており、そのS波速度は構造物の種類や地盤の状況によって異なるが、多くの場合300-700m/s とされている（日本建築学会、2009）。また、N値50以上を深部地盤構造の最上位層とすることが多い。しかし、N値50を下回る地層がより深部に現れる場合もあり、どこまで工学的基盤上面を深くするかについては注意が必要である。

3. 反射法・屈折法地震探査

制御震源（もしくは人工震源）を用いて発生させた振動をいろいろな地点で観測して、地下の岩石や地層の中を地震波として伝わる弾性波が物性の異なる境界で屈折や反射などの現象を生じることを利用して、地下の構造を明らかにする調査手法。主に屈折波を利用して、波の伝わる速度や減衰などを捉える屈折法地震探査と、反射波を利用して、地下の反射面の分布や形状などを捉える反射法地震探査がある。

4. 大深度ボーリング調査

陸域では油・ガス田の発見の為に基礎試錐や柏崎深部地震動観測プロジェクトによる3000m までの掘削例などがあり、海域では調査船「ちきゅう」による調査掘削（南海トラフで約2200mまで掘削）などがある。

5. PS検層

ボーリング孔を利用して、地盤を伝播する弾性波を測定し、速度を求める調査方法を速度検層という。求めようとする弾性波速度にはP波とS波があり、その両方を求める場合をPS検層と呼ぶ。

6. 1次モデル

想定東海地震・東南海地震のための地下構造モデル

（「長周期地震動予測地図」地震調査研究推進本部, 2009）

全国1次地下構造モデル（暫定版）（「長周期地震動予測地図」地震調査研究推進本部, 2012; Koketsu et al., 2008, 2012）

地震調査研究推進本部HP（http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/）で公開。

7. 中小地震の地震動シミュレーションの留意事項

地震動の再現検証を繰り返して修正したモデルであっても、検証に用いていない地震に対する再現計算結果と観測結果とでは、食い違いがみられる場合がある。これらの場合には、浅部および深部地盤の特性に起因しない要因として、震源パラメータやそれぞれの地震の震源と観測点を結ぶ伝播経路に対する地殻構造や異方性も無視できないこともあり、注意が必要である。

8. AVS30（地表から深さ30mまでの平均S波速度）の推定式

AVS30の推定式や地盤増幅度を推定した例として以下がある。

- ・ 松岡・翠川（1994）：関東地方のデータに基づいて国土数値情報の地形区分・標高データ等から経験的に地盤の平均S波速度を求めた。主に関東地方において適用可能な推定式。
- ・ 翠川・松岡（1995）：強震記録から抽出される最大速度に対する地盤の増幅度とAVS30の関係を求め、地形情報・表層データ等をもとに、地形と標高値、河川からの距離によりAVS30の経験式を作成。
- ・ 松岡・他（2005）：微地形ごとのAVS30に見られる地盤の形成過程や堆積環境に起因する有意な違いと、標高、傾斜、古い時代に形成された山地・丘陵からの距離を考慮した、AVS30の推定法を提案。地盤分類250mメッシュマップ用の推定式。

引用文献（アルファベット順）

- Arai, H., and K. Tokimatsu (2004): S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 94, no.1, 53-63.
- 馬場俊孝・伊藤亜紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志 (2006) : 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, S111-006.
- 中央防災会議 (2001) : 国土数値情報を用いた地盤の平均S波速度の推定, 「東海地震に関する専門調査会」(第11回) 資料3-1 関連資料(地震動関係), 1-33.
- 地質調査総合センター編 (2013) : 日本重力データベース DVD版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 6, 1, 11-22.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・先名重樹・大井昌弘・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・早川 譲 (2006) : 強震動評価のための深部地盤構造全国初期モデル, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 1466-1469.
- 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・若松加寿江・石川裕・奥村俊彦・石井透・松島信一・早川譲・遠山信彦・成田章 (2009) : 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 336pp.
- 福島美光・翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q-1 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会論文集, 460, 37-46.
- 福和伸夫・荒川正和・小出栄治・石田栄介 (1999) : GIS を用いた既存地盤資料を活用した都市域の動的な地盤モデル構築, 日本建築学会技術報告集, 9, 249-254.
- Gardner, G. H. F., L. W. Gardner, and A. R. Gregory (1974) : Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, 39, 6, 770-780.
- Gassmann, F. (1951) : Über die elastizität poröser medien, Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, 96, 1-23.
- 本多亮・澤田明宏・古瀬慶博・工藤健・田中俊行・平松良浩 (2012) : 金沢大学重力データベースの公表, 測地学会誌, 58, 4, 153-160.
- 今井常雄・殿内啓司 (1982) : N 値と S 波速度の関係およびその利用例, 基礎工, 16, 6, 70-76.
- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986) : 観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震第 2 輯, 39, 151-156.
- 木村敏雄 (2002) : 日本列島の地殻変動 - 新しい見方から -, 愛智出版, 470pp.
- 木村克己・花島裕樹・西山昭一・石原与四郎 (2014) : ボーリングデータ解析による浅部地下地質構造の三次元モデリング: 東京低地北部から中川低地南部の例, 地質調査総合センター特殊地質図 No. 40, 「関東平野中央部の地下地質情報とその応用」, 56-113.
- Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto (2008) : Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. S10-038.
- Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar, and Y. Tanaka (2009) : A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, Tectonophysics, 472, 290-300.
- Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki (2012) : Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1773.

- 河野芳輝・古瀬慶博 (1989) : 100 万分の 1 日本列島重力異常図, 東京大学出版会, 88pp.
- Langston, C. A. (1979) : Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic bodywaves, *J. Geophys. Res.*, 84 (B9), 4749–4762.
- Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake (1970) : Seismic refraction, in *The Sea*, vol. 4, edited by A. E. Maxwell, pp. 53–84, Wiley-Interscience, New York.
- 正木和明 (1984) : 地震防災を対象とした地盤振動特性の評価に関する研究, 東京工業大学博士学位論文, 167pp.
- Matsubara, M., K. Obara, and K. Kasahara (2008) : Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86–103.
- Matsubara, M. and K. Obara (2011) : The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets and Space*, 63, 663–667.
- 松岡昌志・翠川三郎 (1994) : 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤振動シンポジウム資料集, 23–34.
- 松岡昌志・若松加寿江・藤本一雄・翠川三郎 (2005) : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No. 794/I-72, 239–251.
- 松岡昌志・若松加寿江 (2008) : 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936.
- 翠川三郎・松岡昌志 (1995) : 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査, 48, 6, 519–529.
- 日本建築学会 (2009) : 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 丸善株式会社, 163pp.
- 太田裕・後藤典俊 (1976) : S 波速度を他の土質諸指標から推定する試み, 物理探査, 29, 4, 251–261.
- 領木邦浩 (1999) : 西南日本の 3 次元深部構造と広域重力異常, 地震第 2 輯, 52, 51–63.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder (2005) : Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, 462–464.
- 鈴木宏芳 (1996) : 江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 56, 77–123.
- 若松加寿江・松岡昌志 (2003) : 大都市圏を対象とした地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 土木学会地震工学論文集, 27, 050. pdf, CD-ROM.
- 若松加寿江・松岡昌志・久保純子・長谷川浩一・杉浦正美 (2004) : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No. 759/I-67, 213–232.
- 若松加寿江・松岡昌志 (2013) : 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 地震工学会誌, 18, 35–38.
- 山本明彦・志知龍一 (2004) : 日本列島重力アトラスー西南日本および中央日本ー, 東京大学出版会, 136pp, CD-ROM 付.
- 山中浩明・大堀道広・翠川三郎 (2009) : 地震記録に基づく地盤増幅特性の逆解析による関東平野のシームレス S 波速度構造モデルの推定, 日本建築学会学術講演梗概集. B-2, 構造 II, 振動, 47–48.
- 安田進, 藤堂博明, 三村衛, 山本浩司 (2009) : 表層地盤情報データベース連携に関する研究, 第 3 回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集, 49–58.
- Zhao, D., A. Hasegawa, and H. Kanamori (1994) : Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events, *J. Geophys. Res.*, 99 (B11), 22313–22329.