

震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」)

Strong ground motion prediction method for earthquakes with specified source faults
(“Recipe”)

令和 2 年 (2020 年) 3 月
地震調査研究推進本部 地震調査委員会

March, 2020
Earthquake Research Committee,
The Headquarters for Earthquake Research Promotion

震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）

目次

1. 特性化震源モデルの設定	1
1.1 活断層で発生する地震の特性化震源モデル	2
1.1.1 巨視的震源特性	2
1.1.2 微視的震源特性	8
1.1.3 その他の震源特性	14
1.2 プレート間地震の特性化震源モデル	15
1.2.1 巨視的震源特性	16
1.2.2 微視的震源特性	17
1.2.3 その他の震源特性	19
1.3 スラブ内地震の特性化震源モデル	19
1.3.1 巨視的・微視的震源特性	19
2. 地下構造モデルの作成	22
2.1 地震基盤以深の地殻構造	23
2.2 深部地盤構造	23
2.2.1 通常の場合	23
2.2.2 水平成層構造が仮定できる場合	26
2.3 浅部地盤構造	26
2.3.1 ボーリングデータによるモデル化の方法	26
2.3.2 微地形区分によるモデル化の方法	28
2.4 浅部・深部統合地盤構造モデル	29
3. 強震動計算	31
3.1 工学的基盤上面までの計算方法	31
3.2 工学的基盤上面から地表面までの計算方法	32
3.2.1 ボーリングデータによってモデル化された「浅部地盤構造」を用いる場合	32
3.2.2 面的な評価によってモデル化された「浅部地盤構造」を用いる場合	33
3.2.3 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された「浅部・深部統合地盤構造モデル」を用いる場合	35
4. 予測結果の検証	37
4.1 活断層で発生する地震の強震動予測結果に対する検証	37
4.1.1 距離減衰式を用いた推定値との比較	37
4.1.2 震度分布との比較	37
4.1.3 観測波形記録との比較	38
4.2 プレート間地震の強震動予測結果に対する検証	38
4.2.1 震度分布との比較	38
4.2.2 観測波形記録との比較	38
4.2.3 距離減衰式を用いた推定値との比較	39

4.3 スラブ内地震の強震動予測結果に対する検証	39
引用文献	40

震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）

令和2年3月6日改訂

「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」（以下「レシピ」と呼ぶ）は、地震調査委員会において実施してきた強震動評価に関する検討結果から、強震動予測手法の構成要素となる震源特性、地下構造モデル、強震動計算、予測結果の検証の現状における手法や震源特性パラメータの設定にあたっての考え方について取りまとめたものである。地震調査委員会では、これまでに「活断層で発生する地震」について11件、「海溝型地震」のうちプレート境界で発生する地震について4件、併せて15件の強震動評価を実施し、公表してきている¹。また、平成12年（2000年）鳥取県西部地震、平成15年（2003年）十勝沖地震、2005年福岡県西方沖の地震のK-NETおよびKiK-net観測網や気象庁および自治体震度計観測網などの観測記録を用いた強震動予測手法の検証を実施した（地震調査委員会強震動評価部会, 2002；2004；2008）。

また、「レシピ」は、震源断層を特定した地震を想定した場合の強震動を高精度に予測するための、「誰がやっても同じ答えが得られる標準的な方法論」を確立することを目指しており、今後も強震動評価における検討により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。

付図1に、「レシピ」に従った強震動予測の流れを示す。「レシピ」は、①特性化震源モデル²の設定、②地下構造モデルの作成、③強震動計算、④予測結果の検証の4つの過程からなる。以降では、この流れに沿って各項目について解説する。

この「レシピ」は、個々の断層で発生する地震によってもたらされる強震動を詳細に評価することを目指している。但し、日本各地で長期評価された多数の活断層帯で発生する地震の強震動を一定以上の品質で安定的に計算するために、地表の活断層長さ等から地震規模を設定する方法も併せて掲載する。

ここに示すのは、最新の知見に基づき最もあり得る地震と強震動を評価するための方法論であるが、断層とそこで将来生じる地震およびそれによってもたらされる強震動に関して得られた知見は未だ十分とは言えないことから、特に現象のばらつきや不確定性の考慮が必要な場合には、その点に十分留意して計算手法と計算結果を吟味・判断した上で震源断層を設定することが望ましい。

1. 特性化震源モデルの設定

特性化震源モデルの設定では、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊過程を示すその他の震源特性、という3つの震源特性を考慮して、震源特性パラメータを設定する。

ここで説明する震源特性パラメータの設定方法は、想定した震源断層で発生する地震に対して、特性化震源モデルを構築するための基本的な方針を示したものであり、強震動予測における震源断層パラメータの標準的な値の設定が、再現性をもってなされることを目指したものである。

以下、特性化震源モデルにおける震源特性パラメータの設定方法について、地震のタイプ（活断層で発生する地震と海溝型地震（プレート間地震（プレート境界地震）およびスラブ内地震））ごとに説明する。

¹ 地震調査研究推進本部のホームページで強震動評価が公表されている。<https://www.jishin.go.jp/>

² 強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータで表した震源モデルを「特性化震源モデル」と呼ぶ。特性化震源モデルは、活断層においては震源断層の形態・規模を示す巨視的震源特性、断層の不均質性を示す微視的震源特性及び、破壊過程を示すその他の震源特性を考慮した震源断層モデルである。「特性化」はSomerville *et al.* (1999) のcharacterizationの訳語に由来する。

1.1 活断層で発生する地震の特性化震源モデル

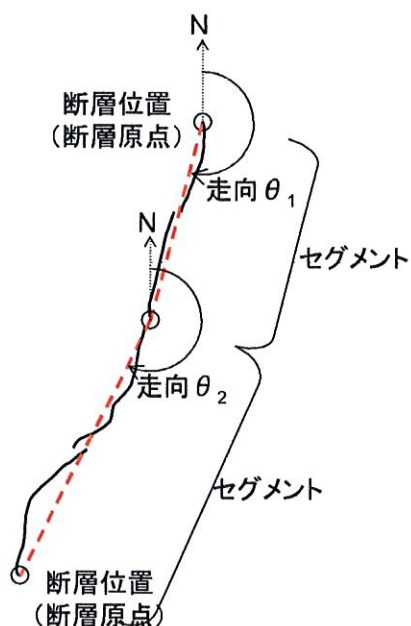
活断層で発生する地震は、海溝型地震と比較して地震の発生間隔が長いために、最新活動時の地震観測記録が得られていることは稀である。したがって、活断層で発生する地震を想定する場合には、変動地形調査や地表トレンチ調査による過去の活動の痕跡のみから特性化震源モデルを設定しなければならないため、海溝型地震の場合と比較してそのモデルの不確実性が大きくなる傾向にある。このため、そうした不確実性を考慮して、複数の特性化震源モデルを想定することが望ましい。

ここでは、過去の地震記録や調査結果などの諸知見を吟味・判断して震源断層モデルを設定する場合（1.1.1 (ア) 参照）と、長期評価された地表の活断層長さ等から地震規模を設定し震源断層モデルを設定する場合（1.1.1 (イ) 参照）とについて、巨視的震源特性の設定方法を解説する。付図2に、活断層で発生する地震に対する震源特性パラメータの設定の全体の流れを示す。

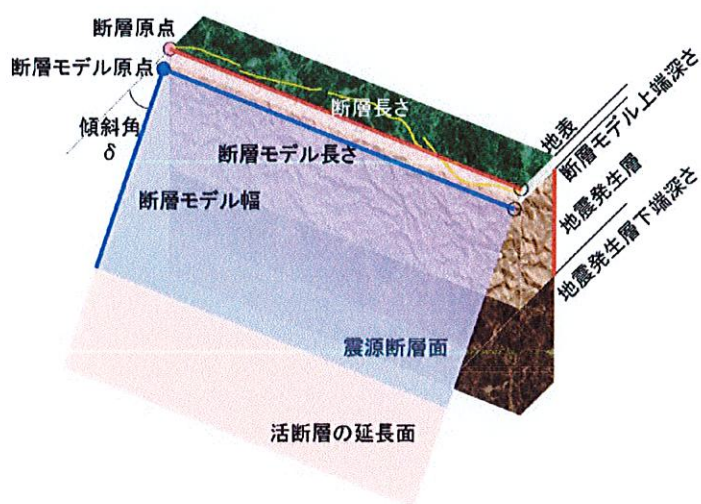
1.1.1 巨視的震源特性

活断層で発生する地震における震源断層モデルの巨視的震源特性に関するパラメータとして、

- ・ 震源断層モデルの位置と構造（位置、走向、セグメント³）
- ・ 震源断層モデルの大きさ（長さ・幅）・深さ・傾斜角
- ・ 地震規模
- ・ 震源断層モデルの平均すべり量



位置、走向、セグメント



断層モデル長さ、幅、深さ、傾斜角

を設定する。

³ 最大規模の地震を発生させる単位にまとめた活断層の中で、分割放出型地震としてやや規模の小さな地震を発生させる単位で、根拠としたデータにより、地震セグメント、幾何セグメント、挙動セグメントまたは活動セグメントに分類される。強震動評価においては、詳細な定義は行わずセグメントという表現を用いる。

(a) 震源断層モデルの位置・構造

震源断層モデルの位置の設定にあたっては、基本的に、地震調査委員会による長期評価結果（以下、「長期評価」と呼ぶ）で示された活断層位置図を参照する。ただし、長期評価で示される断層帯の両端の点は、活断層（帯）の分布が確認された位置の両端を示しているだけなので、震源断層モデルの位置や走向を設定する際には、必ずしもその活断層（帯）の両端の点を結んだ直線の走向に合わせる必要はない。長期評価における記述を参照し、両端の点より震源断層モデルを延長させること（地震調査委員会, 2003d ; 2004a）や、両端の点を結んだ直線より震源断層モデルを平行移動させること（地震調査委員会, 2004d）を検討する場合もある。また、活断層（帯）が屈曲しており、上記の両端の点を結んだ線から活断層（帯）の一部が5km以上離れている場合には、震源断層モデルを活断層（帯）に沿って複数の直線でモデル化することも想定する（地震調査委員会, 2003e ; 2004e）。

セグメントについては、長期評価で活動区間が分けられているものについては、それを強震動評価におけるセグメントに置き換えることを基本とするが、後述するアスペリティ⁴の数、位置との関係も考慮して設定する。

なお、長期評価がなされていない活断層（帯）については、変動地形調査や既存のデータを取りまとめた「新編日本の活断層」（活断層研究会編, 1991）、「都市圏活断層図」（国土地理院）、「活断層詳細デジタルマップ」（中田・今泉編, 2002）などを基に設定する。その際、付近に複数の断層が存在する場合には、松田（1990）の基準に従って、起震断層を設定する。

(ア) 過去の地震記録や調査結果などの諸知見を吟味・判断して震源断層モデルを設定する場合

過去の地震記録などに基づき震源断層を推定する場合には、その知見を生かした断層モデルの設定を行う。

(b) 震源断層モデルの大きさ（長さ L ・幅 W ）・深さ・傾斜角（ δ ）

震源断層モデルの長さ L (km) については、(a) 震源断層モデルの位置・構造で想定した震源断層モデルの形状を基に設定する。幅 W (km) については、入倉・三宅（2001）による下記に示した W と L の経験的関係、

$$W = L \quad (L < W_{\max}) \dots\dots\dots (1-a)$$

$$W = W_{\max} \quad (L \geq W_{\max}) \dots\dots\dots (1-b)$$

を用いる。ここで、

$$W_{\max} = T_s / \sin \delta$$

$$T_s = H_d - H_s$$

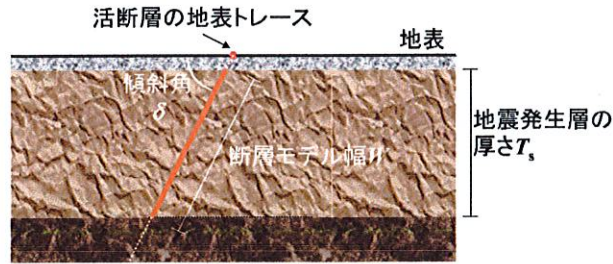
T_s : 地震発生層の厚さ (km) ($T_s \leq 20$ km)

δ : 断層の傾斜角

H_d 、 H_s : それぞれ地震発生層下限および断層モデル上端の深さ (km) (微小地震の深さ分布から決めることができる (Ito, 1999))

(1-b)式は、内陸地殻内の活断層で発生する地震の震源断層モデルの幅 W が、地震発生層の厚さ T_s に応じて飽和して一定値となることを示している。

⁴ 震源断層の中で特に強い地震波を生成する領域（すべり量や応力降下量が多い領域）。



地震発生層の厚さ T_s と断層モデル幅 W の関係

震源断層モデルの傾斜角については、地表から地震発生層の最下部にいたる活断層全体の形状が実際に明らかとなった例は少ないが、その一方で、次の地震規模の推定に大きな影響を与えるため、注意深く設定する必要がある。そこで、対象とする断層についての反射法探査結果など、断層の傾斜角を推定する資料がある場合にはそれを参照する（例えば、地震調査委員会, 2004a）。また、周辺にある同じタイプの断層から傾斜角が推定できる場合には、それらを参照する。上記のような資料が得られない場合は、断層のずれのタイプ（ずれの方向）により次に示す傾斜角を基本とする。

逆断層：45°
正断層：45°
横ずれ断層：90°

ただし、周辺の地質構造、特に活断層の分布を考慮し、対象断層とその周辺の地質構造との関係が説明できるように留意する。また、「長期評価」により、「低角」または「高角」とある場合には、上記の点に留意して、それぞれ、0°～30°、60°～90°の範囲内で設定する。

震源断層モデルの上端の深さについては、微小地震発生層の上限深さ（微小地震の浅さ限界）と一致するものとする。これは、震源の動力学モデルの研究から、地表付近の数kmに及ぶ堆積岩層において応力降下がほとんど発生しなくてもその下の基盤岩部分の地震エネルギーを放出させる破壊が堆積岩層に伝わり、地表に断層変位として達することがわかってきたためである（例えば、Dalguer *et al.*, 2001）。

(c) 地震規模（地震モーメント M_0 ）

地震モーメント M_0 (N・m)、震源断層の面積 S (km²) との経験的關係より算出する。Somerville *et al.* (1999) によると地震モーメントと震源断層の面積の關係は、

$$M_0 = \left(\frac{S}{2.23} \times 10^{15} \right)^{3/2} \times 10^{-7} \dots\dots\dots (2)$$

となる⁵。ただし、上式は、過去の大地震の強震記録を用いた震源インバージョン結果をもとにしており、この中にはM8クラスの巨大地震のデータは含まれていない。一方、Wells and Coppersmith (1994) では余震・地殻変動データを基に解析されたM8クラスの巨大地震のデータを含んでおり、これらによる地震モーメントに対する震源断層の面積は、地震規模が大きくなると上式に比べて系統的に小さくなっている。したがって、地震モーメントが大きい地震については、入倉・三宅 (2001) の提案によるWells and Coppersmith (1994) などのデータに基づいた次式を用いる。

$$M_0 = \left(\frac{S}{4.24} \times 10^{11} \right)^2 \times 10^{-7} \dots\dots\dots (3)$$

なお、(3)式を適用するのは、 $M_0=7.5 \times 10^{18}$ (N・m)（モーメントマグニチュード M_w 6.5相当）以上、

⁵ Somerville *et al.* (1999)や入倉・三宅 (2001) はCGS単位系で記述されているが、ここではMKS単位系にて記述することとする。

$M_0 = 1.8 \times 10^{20} \text{ (N}\cdot\text{m)}$ ($M_w 7.4$ 相当) 以下の地震とする。

一方、 $M_0 = 1.8 \times 10^{20} \text{ (N}\cdot\text{m)}$ を上回る地震では、断層長さや断層変位量に関する Stirling *et al.* (2002) のデータの再検討結果や、震源インバージョン結果に基づき、Murotani *et al.* (2015) の提案による次式を用いる。

$$M_0 = S \times 10^{17} \dots\dots\dots (4)$$

なお、(4)式の基になったデータ分布の上限値 $M_0 = 1.1 \times 10^{21} \text{ (N}\cdot\text{m)}$ に留意する必要がある。

* ここでは、利便性に配慮して機械的に値が求められるように、式の使い分けの閾値を決めているが、原理的には断層幅や平均すべり量が飽和しているかどうかでスケール則が変わるため、断層幅が飽和していない場合(1-a)式は(2)式を、飽和している場合(1-b)式は(3)式あるいは(4)式を用いる方が合理的である。また、断層幅と平均すべり量の両方が飽和している場合は(4)式を用いることが望ましい。震源断層の面積を算出するにあたっては、この点にも配慮して、用いる式を選択することが可能である。

(イ) 長期評価された地表の活断層長さ等から地震規模を設定し震源断層モデルを設定する場合

長期評価で評価された地表の活断層長さ $L \text{ (km)}$ から推定される地震規模から、地震規模に見合うように震源断層の断層モデルの面積を経験的關係により推定する。断層モデルの面積の推定までのフローを付図3に示す。このフローは、 $M7$ 以上の場合に適用するものとし、それよりも規模の小さい場合は適宜適切な方法を選定するものとする。また、活断層長さが概ね80kmを超える場合も、適宜適切な方法によりモデル化をすることが望ましい。

(d) 地震規模 (地震モーメント M_0)

地震モーメント $M_0 \text{ (N}\cdot\text{m)}$ については、長期評価による地震規模 (マグニチュード M) と地震モーメント M_0 の経験的關係 (武村,1990) を用いて、

$$\log_{10} M_0 = 1.17 \cdot M + 10.72 \dots\dots\dots (5)$$

とする。ここで、 M は $M = (\log_{10} L + 2.9) / 0.6$ (松田, 1975) より求める。今後、長期評価による地震規模 M は気象庁マグニチュード M_{JMA} と等価とする。

* 活断層長さがおおむね80kmを超える場合は、松田(1975)の基になったデータの分布より、松田(1975)の適用範囲を逸脱するおそれがあるため、例えば、(ア)の方法や「活断層の長期評価手法(暫定版)」報告書(地震調査委員会長期評価部会、2010)記載の方法など、過去の地震の例を参考にしながら、適宜適切な方法でマグニチュード(地震モーメント)を算定する必要がある。

(e) 震源断層の面積 S

震源断層の面積 $S \text{ (km}^2\text{)}$ と地震モーメント $M_0 \text{ (N}\cdot\text{m)}$ の経験的關係に基づき、以下の式により算出する。

$$S = 2.23 \times 10^{-15} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \quad (M_0 < 7.5 \times 10^{18}) \dots\dots\dots (2)'$$

$$S = 4.24 \times 10^{-11} \times (M_0 \times 10^7)^{1/2} \quad (7.5 \times 10^{18} \leq M_0 \leq 1.8 \times 10^{20}) \dots\dots\dots (3)'$$

$$S = 1.0 \times 10^{-17} \times M_0 \quad (M_0 > 1.8 \times 10^{20}) \dots\dots\dots (4)'$$

ここで、 $M_0 = 1.8 \times 10^{20} \text{ (N}\cdot\text{m)}$ ($M_w 7.4$ 相当) を上回る地震では Murotani *et al.* (2015) の(4)' 式を、

$M_0 = 7.5 \times 10^{18}$ (N・m) (M_w 6.5相当) を下回る場合は Somerville *et al.* (1999) の(2)' 式を、それ以外に入倉・三宅 (2001) の(3)' 式を用いる。

(4)' 式の基になったデータ分布の上限値 $M_0 = 1.1 \times 10^{21}$ (N・m) に留意する必要がある。また、(1.1.1 (c)) に付記したように、式の選択には注意が必要である。

(f) 震源断層モデルの幅 W_{model} と震源断層モデルの長さ L_{model}

震源断層幅 W (km) については、震源断層の面積 S (km²) を活断層の長さ L (km) で除した次式により求める。

$$W = S/L \dots\dots\dots (6)$$

ここで、求めた震源断層幅 W (km) と傾斜角 δ (°) を考慮した場合に断層モデル下端が地震発生層を貫く場合と貫かない場合で、震源断層モデル幅の算出方法を変える。地震発生層の下限深さは微小地震の深さ分布から決める (Ito, 1999)。地震発生層の上限深さについては、深い地盤構造から $V_s = 3.0$ km/s 程度の層の深さを目安とする。

i) 震源断層モデルの下端が地震発生層の下限深さを貫かない場合

震源断層モデルの幅 (km) $W_{\text{model}} = W$ より小さい断層モデルメッシュサイズ⁶の倍数

震源断層モデルの長さ (km)

$$L_{\text{model}} = S/W_{\text{model}} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 L より大きい断層モデルメッシュサイズの倍数とする。

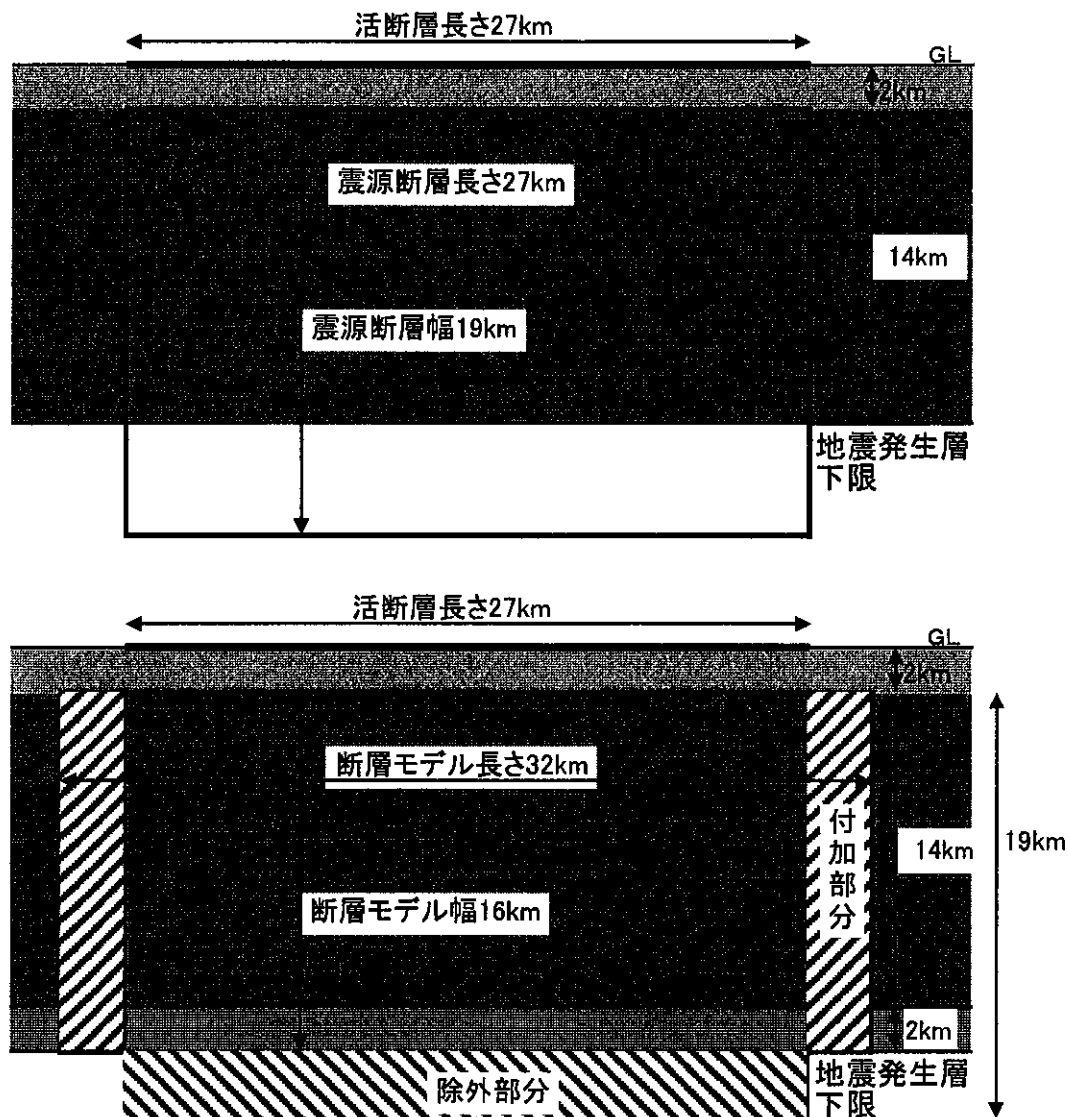
ii) 震源断層モデルの下端が地震発生層の下限深さを貫く場合

震源断層モデルの幅 (km) $W_{\text{model}} =$ 断層モデル下端深さが地震発生層+2km よりも浅い断層モデルメッシュサイズの倍数

断層モデルの長さは、(7)式により求めるが、 L_{model} (km) は L (km) より大きく $L+5$ km 以下の断層モデルメッシュサイズの倍数とする。

傾斜角は、長期評価に基づくこととするが、評価されていない場合には、付図4に示すフローに従う。

⁶ ハイブリッド合成法で用いることを念頭に、震源断層モデルは統計的グリーン関数法で用いるメッシュサイズを最小単位として計算する。現時点では、メッシュサイズを2km四方として計算することとしており、ここでは震源断層モデルの長さとは幅は2の倍数として扱っている。今後、統計的グリーン関数法の計算方法の進捗に応じこの値については再検討を行う必要がある。



断層モデル長さおよび幅の概念図
(上) 初期モデル、(下) 修正モデル

(g) 震源断層モデルの面積 S_{model}

震源断層モデルの面積 S_{model} (km^2) は、震源断層モデルの長さ L_{model} (km) および震源断層モデルの幅 W_{model} (km) から次式により求める。

$$S_{\text{model}} = L_{\text{model}} \cdot W_{\text{model}} \dots\dots\dots (8)$$

震源断層モデルの面積 S_{model} (km^2) を震源断層面積と等価と見なし、1.1.2 微視的震源特性のパラメータ設定を行う。

(ウ) (ア) と (イ) に共通

(h) セグメントごとの地震モーメント M_0

複数のセグメントが同時に動く場合は、セグメントの面積の総和を震源断層の面積とし、(2)、(3)、(4)式を用いて全体の地震モーメント M_0 (N・m) を算出する。個々のセグメントへの地震モーメントの配分は、すべてのセグメントで平均応力降下量が一定となるよう、次式に示すようにセグメントの面積の1.5乗の重みで配分する。

$$M_{0i} = M_0 \cdot S_i^{3/2} / \sum S_j^{3/2} \dots\dots\dots (9)$$

M_{0i} : i 番目のセグメントの地震モーメント

S_i : i 番目のセグメントの面積

* 最近発生した複数のセグメントの破壊を伴う大地震のデータの解析からは、セグメントが連動して地震を起こしても個々のセグメントの変位量は一定とするカスケード地震モデルの適合が良いとの報告もある（例えば、栗田，2004；遠田，2004）。特に長大な活断層帯の評価の際には、長期評価と併せてこうした考え方を参照することもある。ただし、セグメント分けを行った場合のスケーリング則や特性化震源モデルの設定方法については、現時点で研究段階にある。

(i) 平均すべり量 D

震源断層全体の平均すべり量 D (m) と地震モーメント M_0 (N・m) の関係は、震源断層の面積 S (km²)（もしくは震源断層モデルの面積 S_{model} (km²)) と剛性率 μ (N/m²) を用いて、

$$D = M_0 / (\mu \cdot S) \dots\dots\dots (10)$$

で表される。剛性率については、地震発生層の密度 ρ (kg/m³)、S波速度 β (km/s) から算出する。

$$\mu = \rho \cdot \beta^2 \dots\dots\dots (11)$$

1.1.2 微視的震源特性

活断層で発生する地震における震源断層モデルの微視的震源特性に関するパラメータとして、

- ・ アスペリティの位置・個数
- ・ アスペリティの面積
- ・ アスペリティおよび背景領域の平均すべり量
- ・ アスペリティおよび背景領域の実効応力
- ・ f_{max} ⁷
- ・ 平均破壊伝播速度
- ・ すべり速度時間関数
- ・ すべり角

を設定する。

⁷ 震源スペクトル特性のうち、加速度スペクトルの振幅レベルが高周波数側において急減し始める周波数。

(a) アスペリティの位置・個数

アスペリティの位置について、起震断層の変位量分布を詳細に調査した最近の研究では、震源断層浅部の変位量分布と起震断層の変位量分布とがよく対応することが明らかにされている(杉山・他, 2002)。これより、震源断層モデルのアスペリティの位置は、活断層調査から得られた1回の地震イベントによる変位量分布、もしくは平均変位速度(平均的なずれの速度)の分布より設定する。

具体的には、

- ・ 長期評価で、変位量の分布についての記述、または、間接的に変位量の地域的差異を表す記述があった場合には、それを参照する(例えば、地震調査委員会, 2002 ; 2004a)
- ・ 活断層詳細デジタルマップに記載されている断層の変位量や時代区分の分布を示す資料より平均変位速度(相当)の値を算出する(例えば、地震調査委員会, 2003a ; 2004c)

等の方法によりアスペリティの位置を設定する。

上記の推定方法は、震源断層深部のアスペリティの位置が推定されないなど、不確実性が高い。しかし、アスペリティの位置の違いは、強震動予測結果に大きく影響することがこれまでの強震動評価結果から明らかになっている(例えば、地震調査委員会, 2002 ; 2003a)。したがって、アスペリティの位置に対する強震動予測結果のばらつきの大きさを把握するため、複数のケースを設定しておくことが、防災上の観点からも望ましい。

アスペリティの個数は、過去の内陸地震の震源インバージョン結果を整理したSomerville *et al.* (1999)によると、1地震当たり平均2.6個としている。また、想定する地震規模が大きくなるにつれて、一般的に同時に動くセグメントが多くなり、アスペリティの数も多くなる傾向にある。例えば、鳥取県西部地震 ($M_w=6.8$) が2個、兵庫県南部地震 ($M_w=6.9$) が3個であるのに対し、トルコ・コジャエリ地震 ($M_w=7.4$) が5個、台湾・集集地震 ($M_w=7.6$) が6個(Iwata *et al.*, 2001 ; 宮腰・他, 2001)といったこれまでの研究成果がある。アスペリティの個数は、これらの研究成果を参照し、状況に応じて1セグメントあたり1個か2個に設定する。

* アスペリティの位置については、平均的な地震動を推定することを目的とする場合で平均変位速度の分布などの情報に基づき設定できない場合には、やや簡便化したパラメータ設定として、アスペリティが1個の場合には中央付近、アスペリティが複数ある場合にはバランス良く配分し、設定するケースを基本ケースとする。この場合にも、必要に応じ複数ケースを設定することが望ましい。

(b) 短周期レベル A とアスペリティの総面積 S_a

アスペリティの総面積 S_a (km^2) は、強震動予測に直接影響を与える短周期領域における加速度震源スペクトルのレベル(以下、短周期レベルと呼ぶ)と密接な関係がある。したがって、震源断層モデルの短周期レベルを設定した上で、アスペリティの総面積 S_a (km^2) を求めることとする。短周期レベルは、表層地盤の影響が少ない固い地盤の観測点や、表層地盤の影響が定量的に把握できている観測点の地震波形を基に推定することができるが、活断層で発生する地震については、発生間隔が非常に長いため、最新活動の地震による短周期レベルの想定が現時点では不可能である。その一方で、想定する地震の震源域に限定しなければ、最近の地震の解析結果より短周期レベルと地震モーメントとの経験的関係が求められている。そこで、短周期レベルの算出に当たっては、次式に示す壇・他(2001)による地震モーメント M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$) と短周期レベル A ($\text{N}\cdot\text{m/s}^2$) の経験的関係を用いる(入倉・他, 2002)。

$$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

アスペリティの総面積 S_a (km^2) は $S_a = \pi r^2$ より求められる。ここでは便宜的に震源断層とアスペリティの形状は面積が等価な円形と仮定する。アスペリティの総面積の等価半径 r (km) は(12)

式によって推定された短周期レベル A ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$) を用いて、(13)式より算出される。

$$r = (7\pi/4) \cdot \{M_0/(A \cdot R)\} \cdot \beta^2 \dots\dots\dots (13)$$

なお、上式は、シングル・アスペリティモデル（ただ1つのアスペリティを持つモデル）における M_0 と A の理論的關係から (14)式 (Boatwright, 1988) および(15)式 (壇・他, 2001) により導出される。

$$M_0 = (16/7) \cdot r^2 \cdot R \cdot \Delta\sigma_a \dots\dots\dots (14)$$

$$A = 4\pi \cdot r \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 R (km) は断層面積 S (km^2) に対する等価半径、 $\Delta\sigma_a$ (MPa) はアスペリティの応力降下量、 β (km/s) は震源域における岩盤のS波速度である。(14)式と(15)式は、複数のアスペリティモデルを持つ場合（マルチ・アスペリティモデル）にも拡張可能であり、両式の値はアスペリティの分割数に依らないことが入倉・他 (2002)によって示されている。アスペリティが複数存在する場合、等価

半径 r (km) は $\sqrt{\sum_{i=1}^N r_i^2}$ （半径が $r_1, r_2, \dots, r_N$ の N 個のアスペリティを想定）で与えられる。

一方、最近の研究成果から、内陸地震によるアスペリティ総面積の占める割合は、断層総面積の平均22% (Somerville *et al.*, 1999)、15%~27% (宮腰・他, 2001) であり、拘束条件にはならないが、こうした値も参照しておく必要がある。アスペリティがセグメントに2個ある場合、各アスペリティへの面積の配分は、最近の研究成果から16:6 (入倉・三宅, 2001)、2:1 (石井・佐藤, 2000) となるとの見方も参照する。

震源断層の長さが震源断層の幅に比べて十分に大きい長大な断層に対して、円形破壊面を仮定することは必ずしも適当ではないことが指摘されている。「レシピ」では、巨視的震源特性である地震モーメント M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$) を、円形破壊面を仮定しない (3)'式および(4)'式から推定しているが、微視的震源特性であるアスペリティの総面積の推定には、円形破壊面を仮定したスケーリング則から導出される (12)~(15)式を適用している。このような方法では、結果的に震源断層全体の面積が大きくなるほど、既往の調査・研究成果と比較して過大評価となる傾向にあるため、微視的震源特性についても円形破壊面を仮定しないスケーリング則を適用する必要がある。しかし、長大な断層のアスペリティに関するスケーリング則については、そのデータも少ないことから、未解決の研究課題となっている。そこで、このような場合には、(12)~(15)式を用いず、Somerville *et al.* (1999) による震源断層全体の面積に対するアスペリティの総面積の比率、約22%からアスペリティの総面積を推定する方法がある。ただし、この場合には、アスペリティの応力降下量の算出方法にも注意する必要がある、この方法については、(d) 震源断層全体及びアスペリティの静的応力降下量と実効応力及び背景領域の実効応力で説明する。

(c) アスペリティ・背景領域の平均すべり量 D_a, D_b

アスペリティ全体の平均すべり量 D_a (m) は震源断層全体の平均すべり量 D (m) の ξ 倍とし、最近の内陸地震の解析結果を整理した結果 (Somerville *et al.*, 1999; 石井・他, 2000) を基に、 $\xi=2$ とする。

$$D_a = \xi \cdot D \dots\dots\dots (16)$$

これにより、背景領域の平均すべり量 D_b (m) は全体の地震モーメント M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$) からアスペリティの地震モーメント M_{0a} ($\text{N}\cdot\text{m}$) を除いた背景領域の地震モーメント M_{0b} ($\text{N}\cdot\text{m}$) と、背景領域の面積 S_b (km^2) から、以下の式で算出される。

$$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a \dots\dots\dots (17)$$

$$M_{0b} = M_0 - M_{0a} \dots\dots\dots (18)$$

$$D_b = M_{0b}/(\mu \cdot S_b) \dots \dots \dots (19)$$

ここで、 μ は(11)式の剛性率 (N/m²)である。

個々のアスペリティの平均すべり量 D_{ai} (m) は、個々のアスペリティを便宜的に円形破壊面と仮定した場合に、個々のアスペリティの面積 S_{ai} (km²) (i 番目のアスペリティの面積) から算出される半径 r_i (km) (i 番目のアスペリティの半径) との比が全てのアスペリティで等しい ($D_{ai}/r_i = \text{一定}$) と経験的に仮定し、次式により算出する。

$$D_{ai} = (\gamma_i / \sum \gamma_j^3) \cdot D_a \dots \dots \dots (20)$$

ここで、 γ_i は r_i/r であり、 D_{ai} (m) は i 番目のアスペリティの平均すべり量、アスペリティ全体の等価半径 r (km)は、(13)式により求めることができる。

*ただし、こうして求めた最大アスペリティの平均すべり量と、トレンチ調査で推定されるすべり量が著しく異なる場合には必要に応じて、(16)式の ξ の値を調整する。

(d) 震源断層全体及びアスペリティの静的応力降下量と実効応力及び背景領域の実効応力 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_a, \sigma_b$

アスペリティの静的応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa)については、Madariaga (1979)により以下の式が提案されている。

$$\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma \dots \dots \dots (21-1)$$

$\Delta\sigma$: 震源断層全体の静的応力降下量 (MPa)

S : 震源断層全体の面積 (km²)

S_a : アスペリティの総面積 (km²)

(21-1)式を用いれば、震源断層全体の面積 S (km²) とアスペリティの総面積 S_a (km²) の比率、および震源断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa) を与えることにより、アスペリティの静的応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa) が算出できる。

円形破壊面を仮定できる規模の震源断層に対しては、震源断層全体の地震モーメント M_0 (N・m) が震源断層全体の面積 $S (= \pi R^2)$ (km²) の1.5乗に比例する (Eshelby, 1957) ため、(21-1)式と等価な式として、(14)式を変形して得られる次式により $\Delta\sigma_a$ を算出することができる。

$$\Delta\sigma_a = (7/16) \cdot M_0 / (r^2 \cdot R) \dots \dots \dots (21-2)$$

ここで、アスペリティ全体の等価半径 r (km) は、(13)式により求めることができる。

一方、(b) 短周期レベルとアスペリティの総面積でも触れたように、長大な断層に関しては円形破壊面を仮定して導かれた (13)式を用いたアスペリティの等価半径 r (km) を算出する方法には問題があるため、(21-2)式を用いることができない。この場合には、(21-1)式からアスペリティの静的応力降下量 $\Delta\sigma_a$ (MPa) を求める。震源断層全体の面積 S (km²) とアスペリティの総面積 S_a (km²) の比率は、Somerville *et al.* (1999) に基づき約22%とする。なお、震源断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa) については、Fujii and Matsu'ura (2000) の研究成果があり、長大な断層に対する地震モーメント M_0 (N・m) と断層形状 (断層幅 W (km)と断層長 L (km)) との関係式として次式を提案している。

$$M_0 = \{WL^2/(aL + b)\} \cdot \Delta\sigma \dots \dots \dots (22-1)$$

W : 断層幅 (km)

L : 断層長さ (km)

a, b : 構造依存のパラメータ (数値計算により与えられる)

内陸の長大な横ずれ断層に対する関係式としては、 $W=15\text{km}$ 、 $a=1.4\times 10^{-2}$ 、 $b=1.0$ を仮定した上で、収集した観測データに基づく回帰計算により、 $\Delta\sigma=3.1\text{ (MPa)}$ を導出している。例えば、震源断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma\text{ (MPa)}$ としてこの 3.1MPa を用いると、(21-1)式から $\Delta\sigma_a$ は約 14.4MPa となり、既往の調査・研究成果とおおよそ対応する数値となる（地震調査委員会, 2005）。ただし、Fujii and Matsu'ura (2000) による 3.1MPa は横ずれ断層を対象とし、上述したようにいくつかの条件下で導出された値であり、その適用範囲等については今後十分に検討していく必要がある（入倉, 2004）が、長大断層の静的応力降下量 $\Delta\sigma\text{ (MPa)}$ に関する新たな知見が得られるまでは暫定値としては $\Delta\sigma=3.1\text{ (MPa)}$ を与えることとする。

他方、円形破壊面を仮定できる規模の震源断層に対しては、Eshelby (1957) を基に(21-2)式と同様にして次式により震源断層全体の静的応力降下量 $\Delta\sigma\text{ (MPa)}$ を算出することができる。

$$\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0 / R^3 \dots\dots\dots (22-2)$$

アスペリティが複数ある場合には、特にその震源域の詳しい情報がない限り、各アスペリティの応力降下量はアスペリティ全体の応力降下量に一致し、すべて等しいと仮定する。さらに、アスペリティの実効応力 $\sigma_a\text{ (MPa)}$ は、経験的にその静的応力降下量 $\Delta\sigma_a\text{ (MPa)}$ とほぼ等しいと仮定する。背景領域の実効応力 $\sigma_b\text{ (MPa)}$ は、壇・他 (2002) に基づき、

実効応力 $\propto$ すべり速度 $\propto$ (すべり量/立ち上がり時間)

立ち上がり時間 = 震源断層(矩形の場合)の幅/(破壊伝播速度 $\times 2$)

の比例関係・近似関係により、アスペリティの個数がセグメントに1つの場合、アスペリティ領域の幅 $W_a\text{ (km)}$ を用いて、

$$\sigma_b = (D_b/W_b)/(D_a/W_a) \cdot \sigma_a \dots\dots\dots (23)$$

より算出し、アスペリティが複数の場合、

$$\sigma_b = (D_b/W_b) \cdot (\sqrt{\pi}/D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \sigma_a \dots\dots\dots (24)$$

とする。ここで $W_b\text{ (km)}$ は背景領域が矩形とした場合の幅であるが、震源断層が不整形の場合には、便宜的に震源断層の面積 $S\text{ (km}^2\text{)}$ から、断層のおおよそのアスペクト比(L/W)を考慮して、断層幅を求める（例えばアスペクト比が2の場合は $W_b = \sqrt{S/2}$ ）。

* 円形破壊面を仮定せずアスペリティ面積比を22%、静的応力降下量を 3.1MPa とする取扱いは、暫定的に、以下のいずれかの断層の地震を対象とする。

- (i) 断層幅と平均すべり量とが飽和する目安となる $M_0 = 1.8 \times 10^{20}\text{ (N}\cdot\text{m)}$ を上回る断層。
- (ii) $M_0 = 1.8 \times 10^{20}\text{ (N}\cdot\text{m)}$ を上回らない場合でも、アスペリティ面積比が大きくなったり背景領域の応力降下量が負になるなど、非現実的なパラメータ設定になり、円形クラックの式を用いてアスペリティの大きさを決めることが困難な断層等。

なお、断層幅のみが飽和するような規模の地震に対する設定方法に関しては、今後の研究成果に応じて改良される可能性がある。

* 以上のように設定した震源特性パラメータを用いて計算された地震波形や震度分布が、検証用の過去の地震データと一致しない場合もある。その場合には、第一義的に推定される地震規模や、短周期レベルを優先してパラメータを再度設定する。過去の地震波形データがある場合は、波形のパルス幅などから個々のアスペリティ面積を推定できる可能性がある。

(e) $f_{\max}$

地震調査委員会強震動評価部会 (2001) では、 $f_{\max}=6\text{Hz}$ (鶴来・他, 1997) および $f_{\max}=13.5\text{Hz}$ (佐藤・他, 1994) の2つのケースを想定し、比較した。その結果、 $f_{\max}=6\text{Hz}$ のケースの方が、既存の距離減衰式の対応が良いことが分かったため、 $f_{\max}=6\text{Hz}$ を用いることとする。

(f) 平均破壊伝播速度 V_r

平均破壊伝播速度 $V_r(\text{km/s})$ は、特にその震源域の詳しい情報がない限り、Geller (1976) による地震発生層のS波速度 β (km/s) との経験式

$$V_r = 0.72 \cdot \beta \dots\dots\dots (25)$$

により推定する。

* 近年の研究においては、Geller (1976) による係数0.72よりも大きい値が得られている。例えば、Somerville *et al.* (1999) は収集した15の内陸地震の震源モデルから、破壊伝播速度として $2.4\text{km/s} \sim 3.0\text{km/s}$ を得ており、平均値は 2.7km/s となっている。これは、地震発生層のS波速度 β を 3.4km/s とすれば、約0.8倍である (片岡・他, 2003)。なお、「レシピ」に従った計算では、破壊伝播速度を変化させると、特に長周期成分の計算結果が大きくばらつくことも確認されている (地震調査委員会強震動評価部会, 2008)。

(g) すべり速度時間関数 $dD(t)/dt$

中村・宮武 (2000) の近似式を用いる。中村・宮武 (2000) の近似式は、

$$dD(t)/dt = \begin{cases} (2V_m/t_d) \cdot t \cdot \{1 - (t/2t_d)\} & 0 < t < t_b \\ b/\sqrt{t - \varepsilon} & t_b < t < t_r \\ c - a_r(t - t_r) & t_r < t < t_s \\ 0 & t < 0 \text{ or } t > t_s \end{cases} \dots\dots\dots (26)$$

$$\varepsilon = (5t_b - 6t_d) / \{4(1 - t_d/t_b)\}$$

$$b = 2V_m \cdot (t_b/t_d) \cdot \sqrt{t_b - \varepsilon} \cdot (1 - t_b/2t_d)$$

c, a_r : 係数

$t_r: (t_s - t_r) = 2:1$

V_r : 破壊伝播速度 (km/s)

で表され、この近似式を計算するためには、

- ・ 最大すべり速度到達時間 t_d (s)
- ・ すべり速度振幅が $1/\sqrt{t}$ に比例するKostrov型関数に移行する時間 t_b (s)
- ・ ライズタイム t_r (s)
- ・ 最大すべり速度振幅 V_m (m/s)

の4つのパラメータを与える。それぞれのパラメータの設定方法は次の通りである。

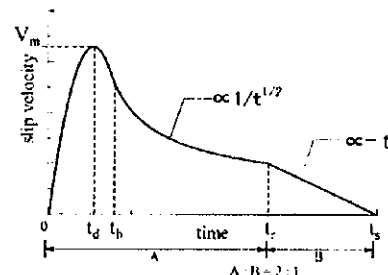
- ・ 最大すべり速度到達時間 t_d (s)

$$t_d \cong 1/(\pi \cdot f_{\max}) \dots\dots\dots (27)$$

- ・ すべり速度振幅が $1/\sqrt{t}$ に比例するKostrov型関数に移行する時間 t_b (s)

(26)式で最終すべり量を与えることにより自動的に与えることができる。

- ・ ライズタイム t_r (s)



すべり速度時間関数の概念図

$$t_r \cong \alpha \cdot W/V_r \dots\dots\dots (28)$$

$$\alpha=0.5$$

・ 最大すべり速度振幅 V_m (m/s)

$$V_m = \Delta\sigma \cdot \sqrt{2f_c \cdot W \cdot V_r} / \mu \dots\dots\dots (29)$$

ここで各パラメータは、

f_c : ローパスフィルタのコーナー周波数($f_{\max}$ と同等) (Hz)

$W = W_a$ (アスペリティ領域においてはアスペリティの幅とする) (km)

$= W_b$ (背景領域においては断層全体の幅とする) (km)

である。

* 地震調査委員会でこれまで実施してきた強震動評価では、壇・佐藤 (1998) による重ね合わせを用いている。片岡・他 (2003) によれば、釜江・他 (1991) による重ね合わせを用いた場合に、シミュレーション解析による地震波形が観測記録を最も良く再現できる α としては、内陸地震 (4地震) では、0.2~0.4程度、海溝型地震 (2地震) では、0.25~0.6程度としている。「鳥取県西部地震の観測記録を利用した強震動評価手法の検証」(地震調査委員会強震動評価部会, 2002) では、釜江・他 (1991) による重ね合わせを用い、 α を0.42~0.49とした場合に観測記録がよく再現できるとしている。 α については、重ね合わせの方法にも配慮して、これらの値を参考に設定することもある。また、すべり速度時間関数を $1/\sqrt{t}$ の関数として計算した地震動は、短周期領域での振幅が小さめに予測される傾向がある。

(h) すべり角 λ

すべり角 $\lambda(^{\circ})$ については、「長期評価」で示されている場合には、これに従う。資料が得られない場合は、断層のずれのタイプ (ずれの方向) により次に示すすべり角を基本とする。

逆断層 : 90°

正断層 : -90°

左横ずれ断層 : 0°

右横ずれ断層 : 180°

* 実際の地震での震源断層におけるすべり角 $\lambda(^{\circ})$ は場所によってばらつきがある。震源断層モデルにおいて、すべり角 $\lambda(^{\circ})$ を断層全体で一定にした場合には、ディレクティビティ効果が強震動予測結果に顕著に表れすぎる傾向がある。

1.1.3 その他の震源特性

その他の震源特性に関するパラメータとして、

- ・ 破壊開始点
- ・ 破壊形態

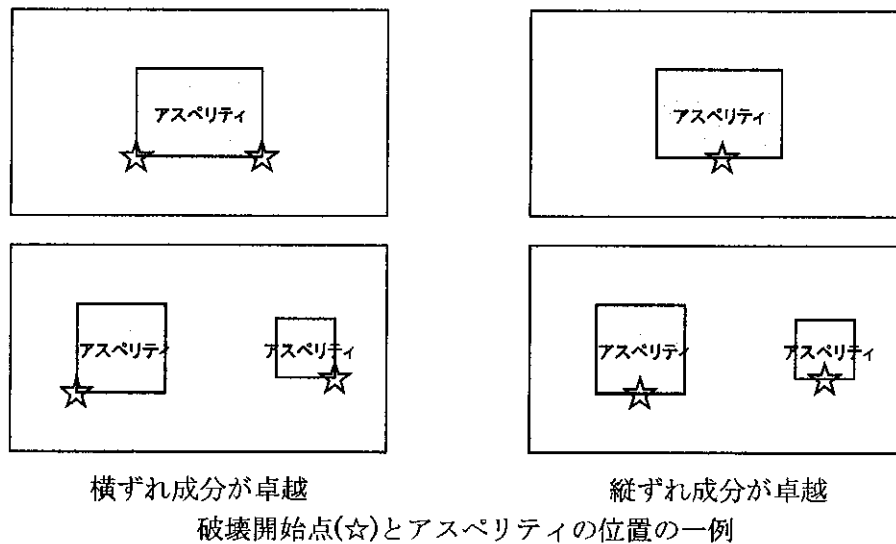
を設定する。

(a) 破壊開始点

中田・他 (1998) による活断層の分岐形態と破壊開始点および破壊進行方向との関係についての

モデル化に基づき、破壊開始点の位置を推定する。破壊開始点の位置は強震動予測結果に大きく影響を与えるため、分布形態がはっきりしない場合には、必要に応じて複数のケースを設定するのが望ましい（例えば、地震調査委員会, 2003c, ; 2004c）。アスペリティの位置との関係については、Somerville *et al.* (1999)、菊地・山中 (2001) によると破壊開始点はアスペリティの外部に存在する傾向にあるため、アスペリティの内部には設定しないようにする。深さについては、菊地・山中 (2001) によると内陸の横ずれ断層は深い方から浅い方へ破壊が進む傾向にあるため、震源断層の下部に設定する。

* 破壊開始点については、平均的な地震動を推定することを目的とする場合で、活断層の形状等から破壊開始点を特定できない場合には、やや簡便化したパラメータ設定として、横ずれ成分が卓越する場合にはアスペリティ下端の左右端、縦ずれ成分が卓越する場合には、アスペリティ中央下端を基本ケースとする。この場合にも、必要に応じ複数ケースを設定することが望ましい。



(b) 破壊形態

破壊開始点から放射状に破壊が進行していくものとし、異なるセグメント間では、最も早く破壊が到達する地点から破壊が放射状に伝播していくと仮定する。なお、セグメント間の破壊伝播時刻差は、次のように求める。

- ・ セグメント間が連続している場合は、そのまま連続的な破壊伝播を仮定
- ・ セグメント間が連続せず離れている場合は、セグメント間の歪み波（S波）の伝播を仮定して算出する。

1.2 プレート間地震の特性化震源モデル

プレート間地震は、活断層で発生する地震と比較して、地震の発生間隔が短いために、海域によっては過去に発生した地震の状況を示す情報が残されており、特性化震源モデルの設定にあたって、それらの情報を活用することができる。また、4. 予測結果の検証でも説明するように、過去の地震関連データを用いて、それぞれの段階で特性化震源モデルの検証を行い、必要があれば震源特性パラメータの見直しを行う。このような特性化震源モデルの見直しの段階では、観測波形等を説明できる震

源特性パラメータが求められることより、以下の「レシピ」を拡大解釈する形で検討することもある。この場合、過去の地震関連データ（地震規模、震源域、地震波形記録、震度、被害など）すべてが整合性あるものとはならない可能性もあり、解析の目的に応じて優先順位をつけてデータを採用することが必要となる。付図5にプレート間地震に対する震源特性パラメータの設定の流れを示す。

1.2.1 巨視的震源特性

プレート間地震の震源断層モデルの巨視的震源特性に関するパラメータとして、

- ・ 震源断層モデルの位置・構造（位置、走向、傾斜、深さ）
- ・ 震源断層モデルの大きさ・地震規模
- ・ 震源断層モデルの平均すべり量

を設定する。

(a) 震源断層の位置・構造（位置、走向、傾斜、深さ）

震源断層の位置については、過去の地震の震源域が推定されている場合には、その位置を基に設定する。深さについては、弾性波探査や微小地震分布等で推定されている想定震源域の海洋プレート上面の深さ分布により、地震発生域の上端から下端にかけて設定する。

「長期評価」で決定された震源の形状評価があれば、その形状評価を推定根拠に留意して利用するのが望ましい。

(b) 震源断層の大きさ・地震規模（断層面積 S 、地震モーメント M_0 ）

震源断層の大きさ・地震規模については、下記のいずれかの方法により設定する。

- ・ (a) 震源断層の位置・構造（位置、走向、傾斜、深さ）により震源域を明確に設定して、その範囲により面積を算出し、地震規模－断層面積の経験的關係から地震規模を推定する。
- ・ 過去の地震から想定されている値を基に地震規模を設定し、地震規模－断層面積の経験的關係から震源断層の面積を設定する。

また、上記の地震規模（地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$ ）－断層面積（ $S(\text{km}^2)$ ）の経験式については、過去の地震のデータがある程度得られている場合には、地域性を考慮した式を用いる。例えば、Kanamori and Anderson (1975) と同様に円形破壊面を仮定した次の関係式 (Eshelby, 1957) を基に震源域の地震の平均応力降下量 $\Delta\sigma(\text{MPa})$ を推定することで、地域的な地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$ と断層面積 $S(\text{km}^2)$ の関係式を設定する。

$$M_0 = 16/(7 \cdot \pi^{3/2}) \cdot \Delta\sigma \cdot S^{3/2} \dots\dots\dots (30)$$

一方、過去の地震のデータがあまり得られていない場合には、平均的な特性を示す地震規模と断層面積（例えば、宇津, 2001；石井・佐藤, 2000）または地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$ と断層面積 $S(\text{km}^2)$ （例えば、佐藤, 1989；Yamanaka and Shimazaki, 1990）などの経験式を用いる。ただし、これらの式を利用するにあたっては経験式のデータセットとなる震源断層の面積がどのように想定されているかに留意する必要がある。

「長期評価」により、震源域の形状評価がある場合には、その形状評価を推定根拠に留意して利用するのが望ましい。

(c) 平均すべり量 D

1.1.1(i)参照。

1.2.2 微視的震源特性

プレート間地震における震源断層の微視的震源特性に関するパラメータとして、

- ・ アスペリティの位置・個数
- ・ アスペリティの面積
- ・ アスペリティ、背景領域の平均すべり量
- ・ アスペリティ、背景領域の実効応力
- ・ $f_{\max}$
- ・ 平均破壊伝播速度
- ・ すべり速度時間関数
- ・ すべり角

を設定する。

(a) アスペリティの位置・個数

近年の研究(菊地・山中, 2001)、平成15年(2003年)十勝沖地震に関する一連の研究(例えば、Yamanaka and Kikuchi, 2003 ; Koketsu *et al.*, 2004 ; Yagi, 2004など)により、同じ震源域で繰り返し発生する地震のアスペリティは、ほぼ同じ位置となる可能性が高いことがわかってきた。したがって、想定する震源域で、近年地震が発生していれば、その観測記録の解析からアスペリティの位置を推測することができる。また、近年の観測記録がなくても、アスペリティではプレート間のカップリング率が周辺より高いと考えられることから、地殻変動データよりバックスリップ(すべり欠損)の分布が推定できれば、バックスリップの大きい箇所がアスペリティの位置になると想定される。あるいは、Wells *et al.* (2003) や Sugiyama (2004) では、負の異常重力域とプレート間地震の震源域におけるアスペリティの位置とに対応関係が見られることを指摘していることから、重力異常のデータを参考にすることもできる。

アスペリティの個数は、アスペリティの位置が推定されている場合には、結果的に想定する震源域に含まれるアスペリティの数に相当する。一般的にはアスペリティの数は想定する震源域・地震規模が大きくなるにつれて、多くなる傾向にある。

(b) 短周期レベル A とアスペリティの総面積 S_a

アスペリティの総面積 S_a (km²) は、強震動予測に直接影響を与える短周期領域における加速度震源スペクトルのレベル(以下、短周期レベルと言う)と密接な関係がある。したがって、震源断層モデルの短周期レベル A (N・m/s²) を設定した上で、アスペリティの総面積 S_a (km²) を求めることとする。短周期レベル A (N・m/s²) は、表層地盤の影響が少ない固い地盤の観測点の地震波形や表層地盤の影響が定量的に把握できている観測点の地震波形を基にいくつかの地震については推定されている。一方、想定する地震の震源域に限定しなければ、最近の地震の解析結果より短周期レベル A (N・m/s²) と地震モーメント M_0 (N・m) との経験的關係が求められている。短周期レベルの値は、条件に応じて下記のいずれかの方法により求める(入倉・他, 2002)。

- ・ 想定震源域における最新活動の地震の短周期レベル A (N・m/s²) が推定されていない場合には、壇・他(2001)による地震モーメント M_0 (N・m) と短周期レベル A (N・m/s²) の経験的關係により設定する((12)式)。
- ・ 想定震源域における最新活動の地震の短周期レベル A (N・m/s²) が推定されている場合には、その推定値と地震モーメント M_0 (N・m) との経験的關係の傾向を参照して、想定する地震の地震モーメントに応じた短周期レベルを設定する(地震調査委員会, 2003b; 2004b)。

アスペリティの総面積 S_a (km²) は、上記によって推定された短周期レベル A (N・m/s²) と前述の(13)式より算出される。アスペリティが1つの場合は、便宜的に震源断層の形状を半径 R (km) の円

形破壊面であるとともに、アスペリティは等価半径 r (km) の円形破壊面が一つあるとして、アスペリティの総面積 $S_a (= \pi r^2)$ (km²) を求める。

一方、最近の研究成果から、7つの海溝型地震によるアスペリティ総面積の占める割合は断層総面積の35%±11%程度(石井・他, 2000)と得られており、拘束条件とはならないがこうした値も参照にしておく必要がある。

アスペリティが複数ある場合、各アスペリティへの面積の配分は、最新活動の地震のアスペリティの大きさやバックスリップの大きい領域に応じて設定するのが望ましい。そのような分解能がない場合には、最近の研究成果からアスペリティが2つの場合は2:1、アスペリティが3つの場合は2:1:0.5となる(石井・佐藤, 2000) との見方も参照して設定する。

(c) アスペリティ・背景領域の平均すべり量 D_a, D_b

1.1.2(c) 参照。

*これにより求められた最大アスペリティの平均すべり量が、海溝型地震の震源域におけるプレート相対運動速度と地震の発生間隔から推定される地震時のすべり量の上限值やこれまでの地震時の推定すべり量の最大値の目安と比較して、矛盾がないことを確認することが望ましい。

(d) 震源断層全体の静的応力降下量・アスペリティの平均静的応力降下量・実効応力及び背景領域の実効応力 $\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_a, \sigma_b$

1.1.2(d) 参照。

*地震規模、断層面積、さらに短周期レベルが与えられると、上の関係式からアスペリティの総面積と実効応力が一意に与えられる。それらのパラメータを用いて計算された地震波形や震度分布が検証用の過去の地震データと一致しないときは、第一義的に推定される地震規模や短周期レベルを優先してパラメータを設定する。過去の地震波形データがある場合は、波形のパルス幅などから個々のアスペリティ面積を推定できる可能性がある。

(e) $f_{\max}$

データの不足等により、地域性を考慮して設定することが困難であるため、現時点では、佐藤・他(1994)により、仙台地域における中小地震の観測記録から推定された $f_{\max} = 13.5\text{Hz}$ を採用する(地震調査委員会, 2003b, ; 2004b)。

(f) 平均破壊伝播速度 V_r

1.1.2(f) 参照。

(g) すべり速度時間関数 $dD(t)/dt$

1.1.2(g) 参照。

(h) すべり角 λ

1.1.2(h) 参照。

*実際の地震での震源断層におけるすべり角は場所によってばらつきがある。震源断層モデルにおいて、すべり角を断層全体で一定にした場合には、ディレクティビティ効果が強震動予測結果に顕著に表れすぎる傾向がある。

1.2.3 その他の震源特性

その他の震源特性に関するパラメータとして、

- ・ 破壊開始点
- ・ 破壊形態

を設定する。

(a) 破壊開始点

破壊開始点の位置については、過去の地震の破壊開始点が把握されている場合にはその位置に設定するのが妥当である。また、菊地・山中(2001)によれば、破壊の進む方向には地域性があり、三陸沖では浅い方から深い方へ、逆に南海トラフでは深い方から浅い方へ破壊が進む傾向がある。このため、今後こうした傾向が様々な海域で明らかになれば、過去の地震の状況が不明な震源域であっても、地域性を考慮した設定を行うことが可能である。

(b) 破壊形態

1.1.3(b) 参照。

1.3 スラブ内地震の特性化震源モデル

スラブ内地震は、プレート間地震のように同じような場所で繰り返し発生するか否かが明らかになっていない。したがって、スラブ内地震は内陸活断層での地震やプレート境界での地震のように発生する場所や震源断層全体の面積を推定することが困難である。しかしながら、近年発生したスラブ内地震によって地震の状況を示す情報が残されており、特性化震源モデルの設定にあたっては、それらの情報を活用することができる。スラブ内地震は、同規模のプレート間地震に比べて強い短周期地震動が観測されることが知られている。そのため、このようなスラブ内地震の特徴である短周期地震動の強さを適切に評価することに主眼を置き、加速度震源スペクトルの短周期レベル（以下、短周期レベル）と強震動生成域の関係をを用いた笹谷・他（2006）、壇・他（2006）および新井・他（2015）の方法を踏まえて巨視的・微視的震源特性に関するパラメータを設定する。具体的には、強震動生成域の面積と震源断層の面積との比が地震規模によらず一定であると仮定し、地震規模と短周期レベルおよび強震動生成域の面積との経験的關係式とアスペリティモデルに基づいて比を設定し、その比を用いて震源断層の面積を設定する。こうした手順を踏むことで、観測では得られにくい震源断層の面積を安定的なパラメータとして設定することが可能となる。設定の概略フローを付図6に示す。

1.3.1 巨視的・微視的震源特性

スラブ内地震における震源断層の巨視的・微視的震源特性に関するパラメータとして、

- ・ 震源断層モデルの地震規模
- ・ 震源断層モデルの大きさ
- ・ 震源断層モデルの位置・構造（位置、走向、傾斜、深さ）
- ・ 震源断層モデルの平均すべり量
- ・ 強震動生成域の位置・個数
- ・ 強震動生成域の面積
- ・ 強震動生成域、背景領域の平均すべり量
- ・ 強震動生成域、背景領域の実効応力

を設定するが、活断層で発生する地震やプレート間地震の設定手順とは異なる。

(a) 震源断層の位置・構造（位置、走向、傾斜、深さ）

長期評価が行われた場合には、その評価を利用することが望ましい。

* 当面は過去の地震の震源断層をプレートに沿って平行移動させることや確率論的地震動予測地図の地震活動モデルに基づいて設定されることが想定される。いずれの場合においても複数の傾斜角を検討することが望ましい。

(b) 震源断層の地震規模（地震モーメント M_0 ）

長期評価が行われた場合には、その評価を利用することが望ましい。

* 当面は過去の地震や確率論的地震動予測地図の地震活動モデルに基づいて設定されることが想定される。

(c) 短周期レベル A

短周期レベル A ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$) は、笹谷・他 (2006) を参照して、壇・他 (2001) による内陸地殻内地震（活断層で発生する地震）の地震モーメント M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$) との経験的關係式 ((12) 式) の4倍として

$$A = 9.84 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \dots\dots\dots (31)$$

により設定する。ただし、フィリピン海プレートの地震に対しては、この値の0.5倍とする（新井・他, 2015）。

* 上記の値は、太平洋プレートの地震は深さ50～80km、フィリピン海プレートの地震は深さ20～50kmを主対象としている。

* 評価対象地域で過去に発生したスラブ内地震について短周期レベルが推定されている場合、その情報を参照することもできる。このとき、 $f_{\max}$ および地震波伝播経路の Q 値も併せて推定されていることが望ましい。

* スラブ内地震の短周期レベルについては、規模の大きな地震（おおむね M_w 7以上）で上限値付近に偏った分布となっていること、震源が深くなるほど大きくなる傾向が見られることが指摘されている。したがって、対象とする地震の規模や深さを勘案して複数のモデルを設定することが望ましい。

* 房総沖および九州～南西諸島の地震の扱いについては未定である。

(d) 強震動生成域の面積の震源断層の面積に対する比 γ_{SMGA}

強震動生成域の面積の震源断層の面積に対する比 γ_{SMGA} を、地震モーメント M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$)、震源域におけるS波速度 β (km/s)と、短周期レベルおよび強震動生成域の面積と地震モーメントとの経験的關係式とを用いて、アスペリティモデルを仮定した場合に得られる

$$\gamma_{\text{SMGA}} = \frac{16A^2 S_a^2}{49\pi^4 \beta^4 M_0^2} \dots\dots\dots (32)$$

により設定する。ここで、 A は (31) 式による算定値を、 S_a は、笹谷・他 (2006) に基づく強震動生成域の面積と地震モーメントとの経験的關係式

$$S_a = 1.25 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \dots\dots\dots (33)$$

による算定値を用いる。

* 地震モーメントと短周期レベルおよび強震動生成域の面積との経験的關係式については、壇・他(2006)による

$$A = 1.13 \times 10^{11} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \dots\dots\dots (31)'$$

$$S_a = 1.71 \times 10^{-16} \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \dots\dots\dots (33)'$$

もあり、この組み合わせで γ_{SMGA} を求めることもできる。

(e) 断層面積 S

震源断層の面積 $S(\text{km}^2)$ は、地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$ と強震動生成域の面積と震源断層の面積との比 γ_{SMGA} および(c)短周期レベル A で設定した短周期レベル $A(\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2)$ を用いて、アスペリティモデルの關係式から得られる

$$S = \frac{7\pi^2\beta^2 M_0}{4A\gamma_{SMGA}^{0.5}} \dots\dots\dots (34)$$

より求められる。

(f) 震源断層全体の平均すべり量 D ・静的応力降下量 $\Delta\sigma$

平均すべり量 $D(\text{m})$ は1.1.1(i)参照。静的応力降下量 $\Delta\sigma(\text{MPa})$ は、地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$ と震源断層の面積 $S(\text{km}^2)$ を用いて、1.1.2(d)の(22-2)式と等価な

$$\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0 / (S/\pi)^{1.5} \dots\dots\dots (35)$$

より求められる。

(g) 強震動生成域全体の面積 S_{SMGA}

強震動生成域全体の面積 S_{SMGA} は、強震動生成域の面積の震源断層の面積に対する比 γ_{SMGA} により求める。

$$S_{SMGA} = \gamma_{SMGA} \times S \dots\dots\dots (36)$$

* 短周期レベルが (31) 式によって与えられた場合、 S_{SMGA} は (33) 式の値となる。

(h) 強震動生成域の位置・個数

強震動生成域の個数については、過去の地震に関する分析による M_w 6未満で1個、 M_w 6～7で2個、 M_w 7～8で3個、 M_w 8以上で5個(笹谷・他、2006)を参考に設定する。

* 強震動生成域の位置は、過去の地震の震源モデルに基づいて設定することや断層面上にバランス良く配置する場合が考えられる。

* 複数の強震動生成域がある場合、個々の面積は強震動生成域全体の面積を等分配することや、活断層で発生する地震やプレート間地震の設定で用いられている比率を用いることが考えられる。

(i) 強震動生成域の平均すべり量 D_{SMGA}

$$D_{\text{SMGA}} = \xi \cdot D \dots\dots\dots (37)$$

スラブ内地震の強震動生成域の平均すべり量と震源断層全体の平均すべり量の関係は十分な知見が得られていないことから、活断層で発生する地震やプレート間地震と同じ $\xi=2$ とする。

(j) 強震動生成域の平均静的応力降下量 $\Delta\sigma_{\text{SMGA}}$ 、実効応力 σ_{SMGA}

$$\Delta\sigma_{\text{SMGA}} = (S/S_{\text{SMGA}}) \cdot \Delta\sigma \dots\dots\dots (38)$$

強震動生成域の実効応力は平均静的応力降下量と等しい ($\sigma_{\text{SMGA}} = \Delta\sigma_{\text{SMGA}}$) と仮定する。

(k) f_{max} 、平均破壊伝播速度 V_f

評価対象地域のスラブ内地震に関するこれらの情報・知見が得られている場合はそれを用いることができる。ない場合は、プレート間地震と同じ値 (1.2.2(e)および(f)参照) とする。

* 評価対象地域に対して推定された f_{max} 値を用いる場合、推定に用いられた伝播経路特性の Q 値があれば地震動計算の際にあわせて設定する。また、計算結果について過去地震の記録や距離減衰式(地震動予測式)との比較により検証を行い、必要に応じて短周期レベルの設定値を見直す。

(l) 背景領域の平均すべり量 D_b 、実効応力 σ_b

プレート間地震と同様 (1.2.2(c)および(d)参照) に求められる。

(m) すべり速度時間関数 $dD(t)/dt$ 、すべり角 λ

内陸活断層地震やプレート間地震と同様 (1.2.2(g)および(h)参照) に設定する。

2. 地下構造モデルの作成

詳細な強震動評価における地下構造モデルを作成する場合、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構造として定義し、地下構造モデルを、工学的基盤⁸と地震基盤⁹の各上面を境界とする以下の3つの区域に分けて作成する。

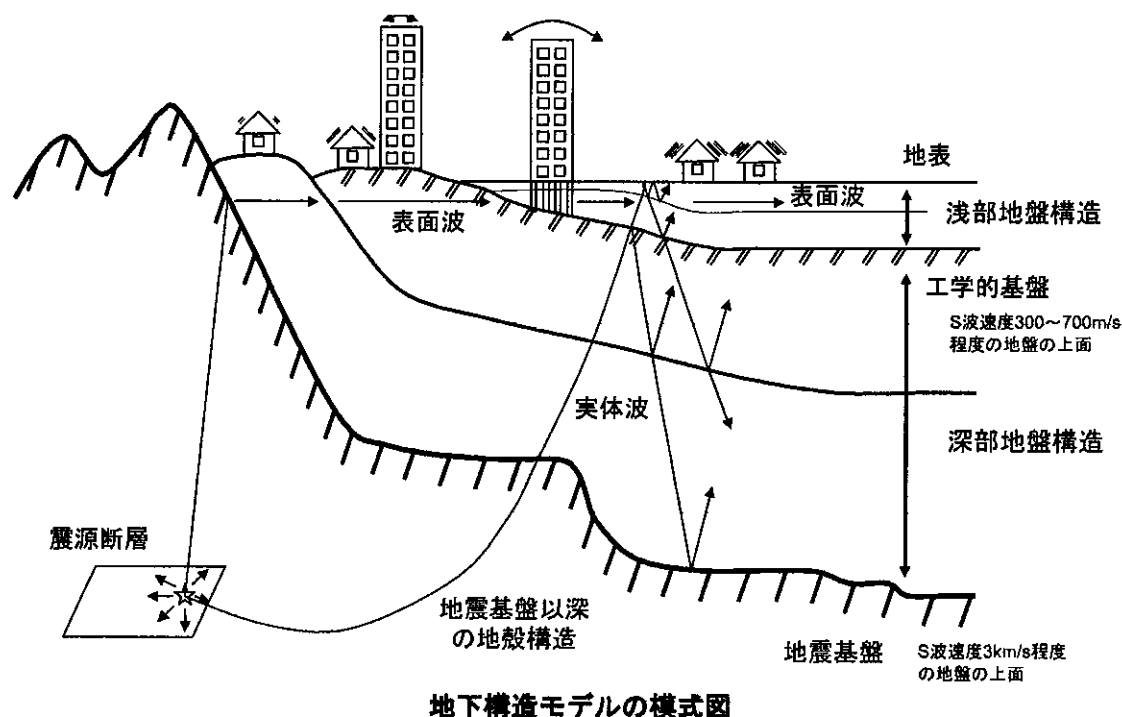
- ・浅部地盤構造：工学的基盤の目安である300～700m/sのS波速度を示す層の上面から地表までの地盤構造。深さは0～数10m。
- ・深部地盤構造：地震基盤の目安である3km/s程度のS波速度を示す層の上面から工学的基盤上面までの地盤構造。深さは数10～3000m程度。
- ・地震基盤以深の地殻構造：地震基盤上面より深い地殻構造。地震波の伝播経路特性に影響する。震央距離によっては、地震波は上部マントルまで伝播するため、上部マントルまでを含めてモデル化するが、ここでは地殻構造と記す。

以下では、3つの区域のモデル化手法について、その考え方を説明する。なお、後述するハイブリッド合成法では「地震基盤以深の地殻構造」と「深部地盤構造」を接合させた三次元地下構造モデルが必要である。さらに、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。そのため、「深

⁸ 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。

⁹ 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)。

部地盤構造」と「浅部地盤構造」を切れ目なくスムーズに接合させてモデル化する必要がある。広域地震動の評価を目的とした、「浅部・深部統合地盤構造モデル」の作成手法についても説明する。



地下構造モデルの模式図

2.1 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、広い領域で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。

2.2 深部地盤構造

2.2.1 通常の場合

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

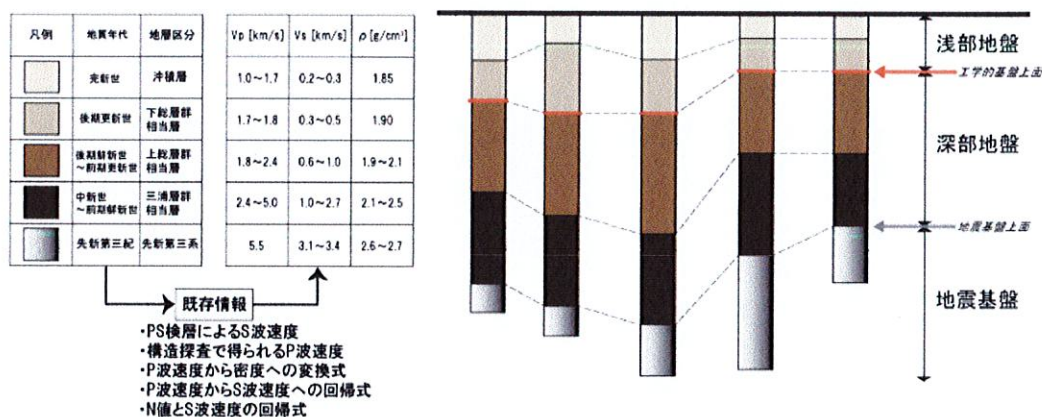
どで得られた地盤構造に関する情報、各種物理探査（反射法・屈折法地震探査、微動探査、重力探査、電磁探査法等）結果や自然地震などを用いた既往研究を収集し整理する。

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¹⁰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領域で作成した地質区分と物性値の対比関係から（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。

ただし、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。また、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。



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

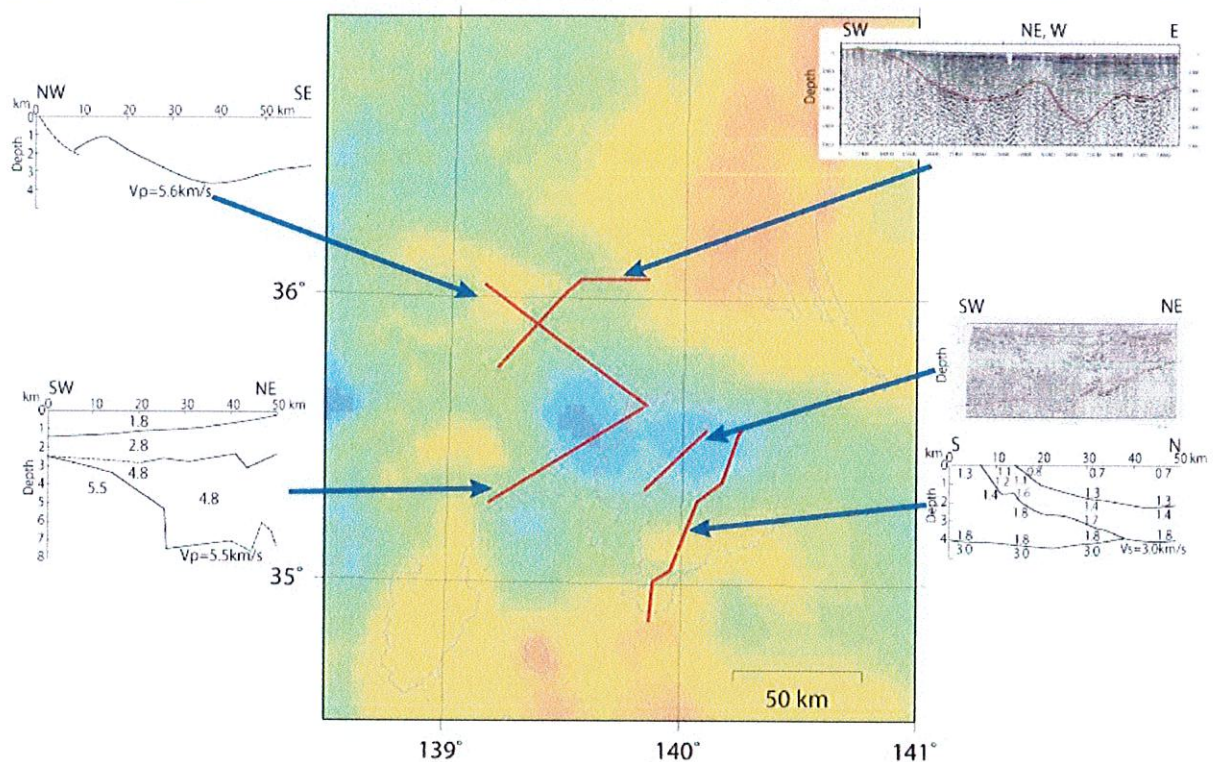
手順(3) 探査データ等を用いたモデルの三次元展開

手順(2)で作成した領域（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領域で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

¹⁰ 「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）平成21年改訂版」の0次モデル（藤原・他, 2006）に相当する。

を行って求めることが望ましい。



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¹¹

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。

手順(5) 地震動の再現計算による速度構造モデルの検証¹²

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

¹¹ 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）平成21年改訂版」の0.5次モデル（藤原・他, 2009）に相当する。

¹² 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）平成21年改訂版」の1次モデルに相当する。「長周期地震動予測地図」地震調査研究推進本部(2012)で公表された全国1次地下構造モデル（暫定版）（Koketsu et al., 2008, 2012）はこの段階のモデルに相当する。

造モデルを作成する領域ごとに検討する必要がある。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。

2.2.2 水平成層構造が仮定できる場合

水平成層構造が想定可能なことがあらかじめわかっている場合には、水平成層構造に対する強震動の理論計算がはるかに容易であるから、三次元的に不均質なモデルをあえて作るのは適切でない。水平成層構造モデルは「地震基盤以深の地殻構造」と同様の方法、震源インバージョン解析で用いられているモデルや、大規模弾性波探査や基礎試錐等の大深度ボーリングの結果、震源決定に使われているモデル等を参照してモデル化を行う。

2.3 浅部地盤構造

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領域も多く¹³、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、浅部地盤構造のモデル化手法として、ボーリングデータを活用する手法と、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を紹介する。

2.3.1 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

モデル化する対象領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。

¹³ ボーリングデータが実は存在したとしても、有効利用の仕組みが不十分なためにデータが散逸しているのが実情である。自治体を含め各機関でデータ公表等は試みられているが、地域の防災対策のためにも、組織的にかつ継続的に統合化し、地下構造データベースとして整備していく仕組み作りが必要と考えられる。

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、関東地方の「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)を設定した(右図)。「山地・丘陵」の区分に属するメッシュの代表柱状図がある場合は N 値を基準として、「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

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。

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、土質区分ごとに N 値と S 波速度の回帰式を検討して、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、上図に示すように、「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」は当該領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。

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。

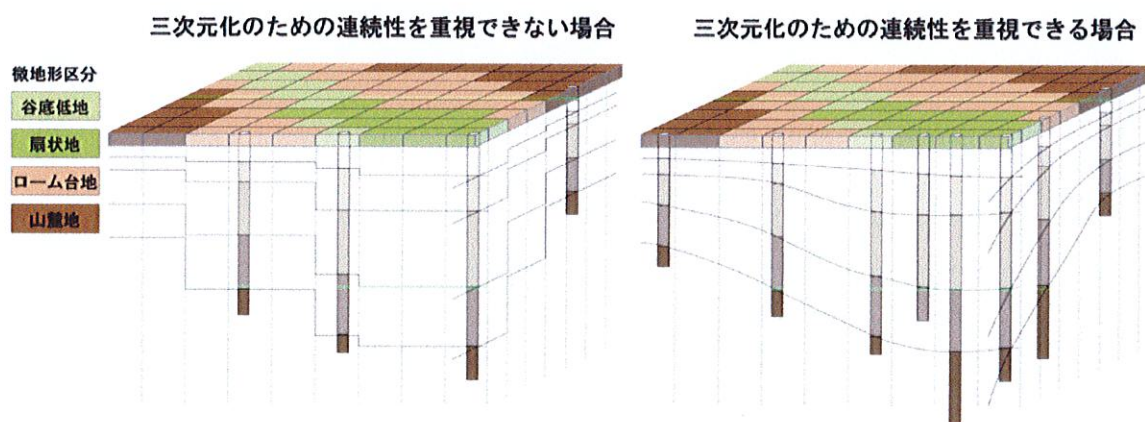
ボーリングデータのない領域が広い場合には、同じ構造が続くことになるが、微地形区分が異なる場合、微地形区分ごとにモデル化された層構造の違いなどは反映されるため、一次元多層構造モデルに近い三次元化になる。ボーリングデータ量に応じてモデルの精度は左右されるが、モデル化が容易であるために広く利用されているモデル化手法である。

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補間する。

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。また、一次元速度構造モデルの補間にあたっては、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。特に、「山地・丘陵」と「台地・低地」の境界領域では、両領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。



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（右）は、データのな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。

2.3.2 微地形区分によるモデル化の方法

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、AVS30と最大速度等の地盤増幅度の関係から各微地形区分での浅部地盤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。既存の微地形区分モデルとして「全国统一基準による地形・地盤分類250mメッシュマップ」（若松・松岡,2013）などがある。これらを用いて簡便に「浅部地盤構造」をモデル化することができる。

2.4 浅部・深部統合地盤構造モデル

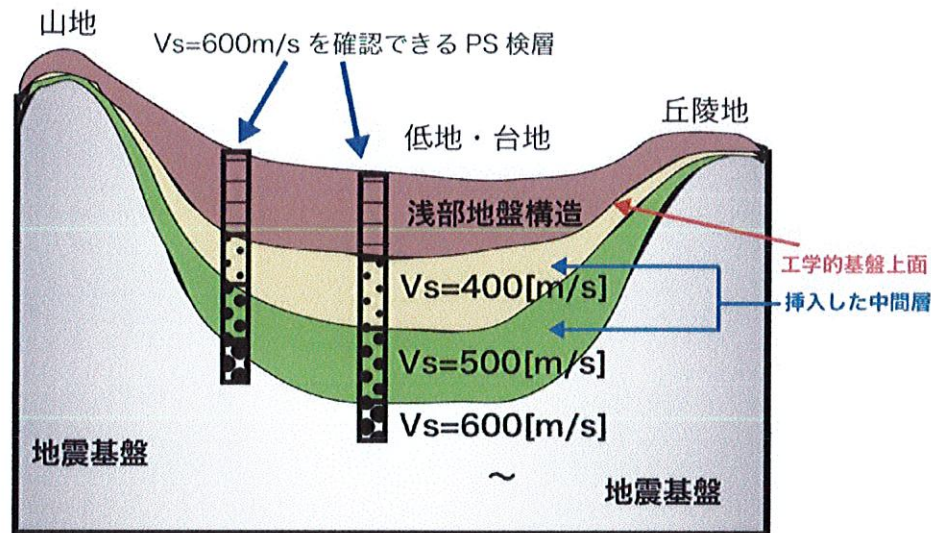
広帯域地震動の評価を目的とし、浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルを統合した浅部・深部統合地盤構造モデルを作成する。ここで作成するモデルによる地盤増幅の評価では、地盤の非線形性の影響を考慮しない。統合したモデルの浅部地盤部分は線形の地震動増幅の計算に用いる。なお、地盤の非線形挙動による地震動変化を考慮するには、非線形特性を仮定した地盤増幅特性の評価を行う必要がある。

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上面（ 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、2.3 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) 深部地盤構造モデルと浅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（ $V_s=400\sim500$ 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。



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・微動観測データから、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。

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。

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)と手順(4)の検証を同時に行うことも可能である。

3. 強震動計算

強震動計算では、地盤のモデル化や設定条件の違いから工学的基盤上面までの計算方法と工学的基盤上面～地表の計算方法では異なるため、それぞれについて説明する。なお、強震動計算の結果は、時刻歴波形、最大加速度、最大速度、応答スペクトルなどを指している。

3.1 工学的基盤上面までの計算方法

工学的基盤上面までの強震動計算方法は、経験的手法、半経験的手法、理論的手法、ハイブリッド合成法の4つに大きく分類され、データの多寡・目的に応じて手法が選択されている（例えば、香川・他, 1998）。それぞれの手法の特徴を述べると、以下のようにまとめられる。

経験的手法

過去のデータを基に、最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトル等の値をマグニチュードと距離の関数で算出する最も簡便な方法である。平均的な値で評価するため、破壊過程の影響やアスペリティの影響は個別には考慮しない。工学的基盤上面における最大速度を求める距離減衰式としては、司・翠川(1999)による経験式がよく用いられる。

$$\log_{10} PGV_b = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log_{10}(X + 0.0028 \cdot 10^{0.50M_w}) - 0.002X \dots \dots \dots (39)$$

PGV_b : 工学的基盤上面の最大速度 (cm/s)

M_w : モーメントマグニチュード $M_w = (\log_{10} M_0 - 9.1) / 1.5$ (Kanamori, 1977)

D : 震源深さ (km)

X : 断層最短距離 (km)

半経験的手法

既存の小地震の波形から大地震の波形を合成する方法で、経験的グリーン関数法と統計的グリーン関数法がある。経験的グリーン関数法は、想定する断層の震源域で発生した中小地震の波形を要素波（グリーン関数）として、想定する断層の破壊過程に応じて足し合わせる方法である。時刻歴波形を予測でき、破壊過程の影響やアスペリティの影響を考慮できる。ただし、予め評価地点で適当な観測波形が入手されている必要がある。統計的グリーン関数法は、多数の観測記録の平均的特性をもつ波形を要素波とする方法である。評価地点で適当な観測波形を入手する必要はない。しかし、評価地点固有の特性に応じた震動特性が反映されにくい。時刻歴波形は経験的グリーン関数法と同様の方法で計算される。

理論的手法

地震波の伝播特性と表層地盤の増幅特性を弾性波動論により計算する方法。時刻歴波形を予測でき、破壊過程の影響やアスペリティの影響を考慮できる。この方法では震源断層の不均質特性の影響を受けにくい長周期領域については評価し得るものの、短周期地震動の生成に関係する破壊過程および地下構造の推定の困難さのため、短周期領域についての評価は困難となる。

ハイブリッド合成法

震源断層における現象のうち長周期領域を理論的手法、破壊のランダム現象が卓越する短周期領域を半経験的手法でそれぞれ計算し、両者を合成する方法。時刻歴波形を予測でき、破壊の影響やアスペリティの影響を考慮できる。広帯域の評価が可能。

特性化震源モデルおよび詳細な地下構造モデルが利用可能な領域では、面的に強震動計算を行う方法として、半経験的手法である統計的グリーン関数法（例えば、釜江・他, 1991；壇・佐藤, 1998）と理論的手法である三次元差分法（例えば、Aoi and Fujiwara, 1999；Graves, 1996；Pitarka, 1999）を合わせたハイブリッド合成法（例えば、入倉・釜江, 1999）がよく用いられる。この理由としては、

- ・ 特性化震源モデルと三次元地下構造モデルの影響を直接取り入れることが可能
- ・ 面的な予測が可能
- ・ 強震動評価の対象となる周期帯(0.1秒～10秒)に対応が可能

といった利点があるためであり、半経験的手法で統計的グリーン関数法を用いるのは面的な予測が容易であるため（経験的グリーン関数法は基本的に波形が観測された地点でしか適用できないため）、理論的手法の三次元差分法を用いるのは、他の不整形な地盤構造のための計算方法（例えば、有限要素法、境界要素法等）と比較して、大規模な地下構造を取り扱う上で、大規模な数値演算を容易に行え、かつ計算時間も速いという利点があるためである。ただし、水平多層構造で想定可能な領域があれば、理論的手法においては水平成層構造のみ適用可能な波数積分を用いる方法（例えば、Kohketsu, 1985；Hisada, 1995）を利用することができる。この方法は水平成層構造のグリーン関数の計算に最もよく用いられている方法であり、モデル化や計算が比較的簡単で、震源断層モデルおよび水平成層構造モデルが妥当であれば、実体波や表面波をよく再現できることが多くの事例から確かめられている。ハイブリッド合成法等については、例えば、「森本・富樫断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討」（先名・他, 2004）等を参考にされたい。

***ハイブリッド合成法では、理論的手法の精度の限界および半経験的手法の有効性を考慮して、接続周期を決めることが望ましい。**

3.2 工学的基盤上面から地表面までの計算方法

工学的基盤上面から地表面までの計算方法は、「浅部地盤構造」の地下構造モデルがボーリングデータによってモデル化された場合、面的な評価によってモデル化された場合、そして「地下構造モデル作成の考え方」（平成29年4月27日公表）に基づいて作成された「浅部・深部統合地盤構造モデル」を用いる場合とで異なるため、それぞれのケースについて説明する。

3.2.1 ボーリングデータによってモデル化された「浅部地盤構造」を用いる場合

ボーリングデータによる詳細なS波速度モデルに基づいて、工学的基盤上面における時刻歴波形を入力として地盤の一次元地震応答計算を行い、地表の時刻歴波形を計算する。地盤の一次元地震応答計算の方法としては、主として、線形解析法（例えば、Haskell, 1960）、等価線形解析法（等価線形化解析法ともいう）（例えば、Schnabel *et al.*, 1972）、逐次非線形解析法（例えば、吉田・東畑, 1991）があり、それぞれに以下の特徴を持つ。

線形解析法

重複反射理論により計算を行うものである。土の非線形特性を考慮していないため、大地震により非線形性が生じる場合には正しい結果が得られない。

等価線形解析法

重複反射理論を基に土の非線形特性を等価な線形の関係に置き換え、解析の間、一定の材料特性を用いる方法である。ひずみレベルが大きくなると精度は低下する。必要とする精度や地盤条件に

もよるが、適用できるひずみレベルの上限は一般的には0.1～1%である。また、強い揺れにより液化等が生じた場合には、正しい結果は得られない。

逐次非線形解析法

材料の非線形特性を数学モデルや力学モデルで表現し、材料特性の変化を逐次計算しながら挙動を求めようとする方法である。したがって、1%を超える大きなひずみレベルでも適用可能となる。その一方で、設定すべきパラメータが多く、専門的な知識を持って解析にあたることが重要である。

発生した地震による地震動分布の再現解析では、今までは等価線形解析法が多く用いられてきた。この理由は、等価線形解析法がパラメータも少なく利用しやすいこと、求められた地震動分布(震度、加速度)が既往の被害地震の地震動分布を大局的に説明できたことなどが挙げられる。逐次非線形解析法は、今までは観測波形の検証や液化した地盤の過剰間隙水圧の上昇やひずみの増大などをみるために、検討対象地点ごとに利用されてきたことが多く、広域の地震動評価に使われた例はまだ多くはない。また、採用する応力-ひずみ関係式やそれに用いるパラメータの設定など専門的な判断をもって個々の解析を行うことが必要であるなど、逐次非線形解析法による広域地震動算出への課題は多い。このようなことから、逐次非線形解析法を広域の地震動評価に用いることは始まったばかりで、まだ検討の必要があると考えられる。

3.2.2 面的な評価によってモデル化された「浅部地盤構造」を用いる場合

工学的基盤上面における最大速度の値に微地形区分から想定される増幅率 amp を掛け合わせることで地表の最大速度を算出する。

微地形区分から想定される増幅率 amp は以下の手順で評価する。

- ① 全国を網羅した約1kmメッシュの領域ごとの微地形区分データ(例えば、若松・他, 2005)、または約250mメッシュの領域ごとの微地形区分データ(例えば、若松・松岡, 2007)を用いる。
- ② その区分に次式に示す標高と表層30mの平均S波速度 $AVS30$ (m/s) との経験的関係(例えば、松岡・他, 2005)をあてはめる。

$$\log_{10} AVS30 = a + b \cdot \log_{10} Ev + c \cdot \log_{10} Sp + d \cdot \log_{10} Dm \pm \sigma \dots\dots\dots (40)$$

$AVS30$: 表層30mの平均S波速度(m/s)

Ev : 標高(m)

Sp : 傾斜*1000 (傾斜は正接)

Dm : 先第三系・第三系の山地・丘陵からの距離(km)

σ : 標準偏差

a, b, c, d : 微地形区分ごとに与えられる回帰係数

- ③ 工学的基盤上面から地表への最大速度の増幅率 amp については、表層30mの平均S波速度 $AVS30$ (m/s) との相関性が認められる。そこで次式を用いて、 $AVS30$ (m/s) から最大速度の増幅率 amp を算出する(例えば、藤本・翠川, 2006)。

$$\log_{10} amp = 2.367 - 0.852 \cdot \log_{10} AVS30 \quad (100 < AVS30 < 1500) \dots\dots\dots (41)$$

amp : 平均S波速度600m/sの工学的基盤を基準とした最大速度増幅率

次に、地表の震度 I を求める。その方法は、工学的基盤上面における地震動として、距離減衰式等の経験式によりその最大値が求められている場合と、ハイブリッド合成法等によりその時刻歴波形が求められている場合とで異なる。それぞれ以下に示す手順により、地表の震度 I を評価する。

i) 距離減衰式等の経験式により工学的基盤上面における最大速度が求められている場合

工学的基盤上面における最大速度 PGV_b (cm/s) に前述の最大速度の増幅率 amp を乗じ、地表の最大速度 PGV (cm/s) を算出する。

$$PGV = amp \cdot PGV_b \dots\dots\dots (42)$$

地表の最大速度 PGV (cm/s) を「最大速度と計測震度の関係式」(例えば、藤本・翠川, 2005) に代入し、地表の震度 I を求める。

$$\begin{aligned} I &= 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10} PGV - 0.213 \cdot \{\log_{10} PGV\}^2 & (4 \leq I) \\ I &= 2.165 + 2.262 \cdot \log_{10} PGV & (I < 4) \dots\dots\dots (43) \end{aligned}$$

ii) ハイブリッド合成法等により工学的基盤上面における時刻歴波形が求められている場合

まず、工学的基盤上面から地表への震度増分 ΔI を評価する。地表の震度を I 、地表の最大速度を PGV (cm/s)、工学的基盤上面における最大速度を PGV_b (cm/s)、最大速度の増幅率を amp とすると、最大速度と計測震度との関係式(藤本・翠川, 2005)を工学的基盤上面における震度 I_b に適用させた(44)式

$$I_b = 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10} PGV_b - 0.213 \cdot \{\log_{10} PGV_b\}^2 \quad (4 \leq I) \dots\dots\dots (44)$$

および前述の $PGV = amp \cdot PGV_b$ の関係から、震度増分 ΔI は、

$$\Delta I = I - I_b = 2.603 \cdot \log_{10} amp - 0.213 \cdot \{\log_{10} amp\}^2 - 0.426 \cdot \log_{10} PGV_b \cdot \log_{10} amp \dots\dots (45)$$

と表される。

したがって、工学的基盤上面における時刻歴波形から気象庁(1996)の方法により工学的基盤上面における計測震度 I_b を算出すると、地表の震度は、

$$I = I_b + \Delta I \dots\dots\dots (46)$$

と求められる。

* 工学的基盤上面から地表までの最大速度に対する増幅率 amp は、表層30mの平均S波速度 $AVS30$ (m/s) の関係から算出している。しかし、山地や丘陵地では30mよりもかなり浅い深さに工学的基盤が現れることが多く、これらより算出される増幅率 amp は過小評価になって工学的基盤で浅の軟弱層の影響をうまく説明できていないとの指摘があり、表層30m以外の深さによる平均S波速度を用いた増幅率の提案がなされている(例えば、川瀬・松尾, 2004; 濱田・他, 2007)。このように、山地や丘陵地等の工学的基盤が30mよ

りも浅いところに現れる場合には、別途検討が必要と考えられる。

- * ボーリングデータを収集できる場合には、微地形区分ごとの $AVS30$ (m/s) あるいは $AVS30$ (m/s)と増幅率の関係を独自に評価することによって、より地域性を取り入れた結果が期待できる（例えば、中央防災会議，2001；2003）。
- * (43) 式は主に近年発生した内陸の地震から推定された式であり、長周期成分が卓越するような海溝型地震に使用すると、最大速度が大きめとなる傾向がある。例えば、森川・藤原（2009）のように翠川・他（1999）の式を使うなど、別途検討が必要と考えられる。
- * 工学的基盤上面における震度を求める(44)式は、地表の震度 I が4以上に対応する式である。地震調査研究推進本部による「震源断層を特定した地震動予測地図」では、震度5弱以上の地点に主眼を置いていることもあり、地表の震度 I が3以下に対しても便宜上(44)式によって計算を行っている（例えば、地震調査委員会，2008）。

3.2.3 「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された「浅部・深部統合地盤構造モデル」を用いる場合

「地下構造モデル作成の考え方」（平成29年4月27日公表）に基づいて作成された「浅部・深部統合地盤構造モデル」が作成されている領域（令和元年8月時点では、関東地方のみ）では、地点ごとにモデルから深さ方向のS波速度の分布を抽出できる。本節では、「浅部・深部統合地盤構造モデル」を利用した地盤の地震応答解析ではなく、「浅部・深部統合地盤構造モデル」から平均S波速度を算出して、工学的基盤上面から地表への最大速度の増幅率および震度増分を評価する方法を示す。本節の方法を3.2.2節の手法と比べた場合、本節の方法では評価点もしくは近傍での微動探査によるS波速度構造モデルから $AVS30$ を推定しており、地盤の地域的な特性や評価点の固有の特性が反映されている。一方、3.2.2節の手法では日本全国のデータに基づいた回帰式によって $AVS30$ を推定しているため、地盤の地域的な特性や評価点の固有の特性が反映されていない。

「工学的基盤上面における最大速度の値に浅部・深部統合地盤構造モデルから想定される増幅率 amp を掛け合わせることで地表の最大速度を算出する。

浅部・深部統合地盤構造モデルから想定される増幅率 amp は以下の手順で評価する。

- ① 地表の最大速度を算出するメッシュごとに、浅部・深部統合地盤構造モデルを用いて、表層30mの平均S波速度 $AVS30_{GL}$ (m/s)と工学的基盤上面から深さ30mの平均S波速度 $AVS30_{EB}$ (m/s)を算出する。ここで、浅部・深部統合地盤構造モデルの最上面が N 値50に相当するS波速度が350m/sの層であることを踏まえ、本節ではS波速度が350m/s以上の層を工学的基盤と定義する。
- ② 工学的基盤上面から地表への最大速度の増幅率 amp は、次式を用いて、 $AVS30_{GL}$ (m/s)および $AVS30_{EB}$ (m/s)から算出する。なお、次式は既往の関係式（藤本・翠川, 2006）を参考に設定したものだが、浅部・深部統合地盤構造モデルから算出した平均S波速度に基づく場合、 $AVS30_{EB}$ (m/s)の適用範囲の下限を350m/sまで拡張しても問題ないことを距離減衰式との比較に基づき確認している。

$$\log_{10} amp = -0.852 \cdot \log_{10}(AVS30_{GL}/AVS30_{EB}) \dots\dots\dots (47)$$

ただし、 $100 < AVS30_{GL} < 1500$, $350 \leq AVS30_{EB} < 1500$

amp : 工学的基盤上面から30mの平均S波速度が $AVS30_{EB}$ (m/s)である場合を基準とした最大速度の増幅率

次に、地表の震度 I を評価する。この方法は、3.2.2i)～ii)と同一である。

i) 距離減衰式等の経験式により工学的基盤上面における最大速度が求められている場合

工学的基盤上面における最大速度 PGV_b (cm/s) に前述の最大速度の増幅率 amp を乗じ、地表の最大速度 PGV (cm/s) を算出する。

$$PGV = amp \cdot PGV_b \dots\dots\dots (48)$$

地表の最大速度 PGV を「最大速度と計測震度の関係式」(例えば、藤本・翠川, 2005) に代入し、地表の震度 I を求める。

$$I = 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10} PGV - 0.213 \cdot \{\log_{10} PGV\}^2 \quad (4 \leq I)$$

$$I = 2.165 + 2.262 \cdot \log_{10} PGV \quad (I < 4) \dots\dots\dots (49)$$

ii) ハイブリッド合成法等により工学的基盤上面における時刻歴波形が求められている場合

まず、工学的基盤上面から地表への震度増分 ΔI を評価する。地表の震度を I 、地表の最大速度を PGV (cm/s)、工学的基盤上面における最大速度を PGV_b (cm/s)、最大速度の増幅率を amp とすると、最大速度と計測震度との関係式(藤本・翠川, 2005)を工学的基盤上面における震度 I_b に適用させた(50)式

$$I_b = 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10} PGV_b - 0.213 \cdot \{\log_{10} PGV_b\}^2 \quad (4 \leq I) \dots\dots\dots (50)$$

および前述の $PGV = amp \cdot PGV_b$ の関係から、震度増分 ΔI は、

$$\Delta I = I - I_b = 2.603 \cdot \log_{10} amp - 0.213 \cdot \{\log_{10} amp\}^2 - 0.426 \cdot \log_{10} PGV_b \cdot \log_{10} amp \dots\dots\dots (51)$$

と表される。

したがって、工学的基盤上面における時刻歴波形から気象庁(1996)の方法により工学的基盤上面における震度 I_b を算出すると、地表の震度は、

$$I = I_b + \Delta I \dots\dots\dots (52)$$

と求められる。

「浅部・深部統合地盤構造モデル」から地点ごとに抽出する深さ方向のS波速度の分布に加えて、地盤材料の動的変形曲線などを適切に設定できれば、3.2.1に示した等価線形解析法または逐次非線形解析法による地盤の一次元地震応答解析の適用が可能になる。しかし、広域の領域を対象とした等価線形解析法または逐次非線形解析法によって十分な信頼性がある地盤の一次元地震応答解析の結果を得るためには、動的変形曲線などの設定に関する検討が必要である。

* 工学的基盤上面における震度を求める(50)式は、地表の震度 I が4以上に対応する式である。地震調査研究推進本部による「震源断層を特定した地震動予測地図」では、震度5弱以上の地点に主眼を置いていることもあり、地表の震度 I が3以下に関しても便宜上(50)

式によって計算を行っている（例えば、地震調査委員会，2008）。

- * ここでは、浅部・深部統合地盤構造モデルの平均S波速度を用いて増幅率 amp を評価する手法を採用したが、浅部・深部統合地盤構造モデルの情報をさらに活用するためには、等価線形解析法もしくは逐次非線形解析法による地盤の地震応答解析を実施することが望ましい。

4. 予測結果の検証

予測結果の検証では、強震動予測結果が妥当であるかどうかを確認する方法について説明する。予測結果の検証は、予測結果と過去の観測事実との比較により行うが、活断層で発生する地震と海溝型地震では地震の発生間隔が異なり、これまでに得られている情報量にも違いがあるため、それぞれの検証方法について示す。

4.1 活断層で発生する地震の強震動予測結果に対する検証

活断層で発生する地震は、発生間隔が長い場合、最新活動における地震の震度情報や観測情報が得られていない場合が多い。したがって、基本的には、距離減衰式を用いた推定値との比較により、活断層で発生する地震の強震動予測結果の検証を行う。

4.1.1 距離減衰式を用いた推定値との比較

半経験的手法や理論的手法による計算結果と距離減衰式を用いた推定値とを比較し、計算結果が距離減衰式を用いた推定値のばらつき（以下、「距離減衰式のばらつき」と呼ぶ）の範囲内にあることを確認する。

距離減衰式を用いた推定値と強震動予測結果との比較にあたっては、地域性を考慮した距離減衰式を用いることが望ましい。地域性を考慮した距離減衰式が作成されていない場合には、既存の距離減衰式との比較を行う。この場合は、設定した震源特性や地下構造モデルの特性が平均的な特性と違う場合には、予測結果のばらつきの傾向も異なってくることから、その点にも十分に留意した上で比較・検証を行うことが重要である。

- * 検証の結果、距離減衰式のばらつきの傾向と強震動予測結果の傾向にかなり差が出て妥当性に問題がある場合には、設定した特性化震源モデルや地下構造モデルを修正する。

4.1.2 震度分布との比較

震度分布は、面的に強震動予測結果を検証するにあたって、現在、最もよく使われる指標である。震度分布としては、明治中期以降の観測情報はそのまま利用することができる。また、江戸時代以降に発生した地震については被害情報が比較的整っていることより、それら被害情報から震度分布が推定されている。震度分布による検証は、震源特性パラメータを設定する比較的早い段階で経験的方法や半経験的方法を用いて行う。

- * この震度分布と計算結果が合わない場合は、震源特性または地下構造モデルの見直しを行う。

4.1.3 観測波形記録との比較

1997年以降のK-NETおよびKiK-net観測網の充実により、強震動予測結果の時刻歴波形と観測記録を比較し、検証することが可能となった。観測記録との比較において、計算波形をどの程度まであわせることができるかという点については、観測波形の質、震源や観測点の地盤状況などの情報の多寡によりケースごとに異なる。現状では条件が整えば、観測記録の位相までを精度良く合わせることが可能であるが、面的な予測ということを考え合わせると、時刻歴波形の最大値、継続時間、周期特性やスペクトル特性がある程度説明できることをもって検証と位置付ける。

- * 計算結果を観測波形に合わせるためには、微視的震源特性や地下構造モデルについて検討し直すことが必要となる。微視的震源特性の把握には震源近傍の強震記録が必要であり、一方地下構造モデルの検証にも強震記録が不可欠であるため、K-NETおよびKiK-net観測網や気象庁および自治体震度計観測網のさらなる充実が望まれる。

4.2 プレート間地震の強震動予測結果に対する検証

プレート間地震は活断層で発生する地震と比較して発生間隔が短いために、最新活動における地震の被害情報や観測情報が残されている場合が多い。したがって、その情報と過去の地震を想定した強震動予測結果を比較することで、強震動予測結果の検証および震源特性などの見直しが可能となる。検証の項目としては、震度分布、観測波形記録、距離減衰式を用いた推定値との比較が挙げられる。

4.2.1 震度分布との比較

4.1.2 参照。

4.2.2 観測波形記録との比較

1960年代以降からデジタル強震記録が得られはじめているため、1968年十勝沖地震以降のプレート間地震を想定する場合には、強震動予測結果の時刻歴波形と観測記録を比較し、検証することが可能である。また、1997年以降はK-NETおよびKiK-net観測網の充実により、より多くの観測記録が得られるようになった。観測記録との比較において、計算波形をどの程度まであわせることができるかという点については、観測波形の質、震源や地盤状況などの情報の多寡によりケースごとに異なる。現状では条件が整えば、位相までを精度良く合わせることは可能であるが、面的な予測ということを考え合わせると時刻歴波形の最大値、継続時間、周期特性やスペクトル特性がある程度説明できることをもって検証と位置付ける。

- * 計算結果を観測波形に合わせるためには、微視的震源特性や地下構造モデルについて検討し直すことが必要となる。微視的震源特性の把握には震源近傍強震記録が必要であり、地下構造モデルの検証にも強震記録が不可欠であるため、K-NETおよびKiK-net観測網や気象庁および自治体震度計観測網、さらには海底地震計のさらなる充実が望まれる。
- * 強震動評価の目的は計算波形を観測波形にあわせることではないため、この作業に終始することのないよう留意する必要がある。

4.2.3 距離減衰式を用いた推定値との比較

4.1.1 参照。

なお、既往の研究成果から、大地震の観測記録が中小地震の観測記録を用いた経験的グリーン関数法により比較的精度良く再現できることが確認されている（例えば、Kamae and Irikura, 1998；池田・他, 2002）。したがって、ハイブリッド合成法による強震動予測結果の検証方法として、対象とする震源断層の周辺で発生した中小地震の観測記録が予め得られている地点を対象に、経験的グリーン関数法とハイブリッド合成法の結果を比較することも可能である。

4.3 スラブ内地震の強震動予測結果に対する検証

プレート間地震と同様に予測結果について震度分布や観測波形記録、距離減衰式（地震動予測式）を用いた推定値との比較により検証を行う。また、必要に応じて短周期レベルの設定値を見直す。

Iwata and Asano (2011) では波形インバージョン結果に基づくスラブ内地震のすべりモデルに基づいて、地震モーメントと震源断層の面積やアスペリティ面積の関係について経験式を与えており、検証に当たって参照することができる。ただし、波形インバージョンに用いられている波形は近地の強震記録のものだけでなく遠地記録を用いたものも含まれており、解析された波形の周期成分に留意する必要がある。また、Iwata and Asano (2011) では、アスペリティ面積は強震動生成域の面積より系統的に大きいことを指摘している。

スラブ内地震の特性化震源モデルでは、短周期地震動の強さを適切に評価することを主眼に置いており、その一方で長周期地震動の検証はできていない。スラブ内地震の長周期地震動の評価については今後の課題である。