

山崎断層帯の地震を想定した強震動評価

地震調査委員会では、山崎（やまさき）断層帯について、その位置および形態、過去や将来の活動等に関する評価結果を「山崎断層帯の評価」（地震調査委員会、2003a；以下「長期評価」という）⁴としてまとめ、公表している。今回、この報告を踏まえ、強震動評価を行ったので以下に報告する。

1 想定する震源断層

山崎断層帯は、岡山県北東部から兵庫県南東部にかけて分布する活断層帯で、西から那岐山（なぎせん）断層帯、山崎断層帯主部、草谷断層の3つの起震断層に区分される。

山崎断層帯主部は、岡山県勝田郡勝田町から兵庫県三木市に至る長さが約80kmで、左横ずれが卓越する断層帯である。那岐山断層帯は、岡山県苫田（とまた）郡鏡野町から岡山県勝田郡奈義（なぎ）町に至る長さが約32kmで、北側が南側に対して相対的に隆起する断層帯である。草谷断層は、兵庫県三木市から兵庫県加古川市に至る長さが約13kmで、右横ずれが卓越する断層帯である。2005年1月1日を起点とした今後30年間の地震発生確率⁵は、山崎断層帯主部のうち北西部で0.08%－1%、南東部で0.03%－5%⁶、那岐山断層帯で0.07%－0.1%、草谷断層ではほぼ0%と評価されており、各地震発生確率の最大値をとると、山崎断層帯主部の南東部は、今後30年間に地震が発生する確率が我が国の主な活断層の中では高いグループに属することになる。

本報告では、「長期評価」を参照して、各断層帯の震源断層位置を図1のように設定した。震源断層としては、山崎断層帯主部のうち、大原断層・土万（ひじま）断層・安富断層と南東部が同時に活動する場合（以下、モデル1とする）、山崎断層帯主部の北西部のうち、大原断層・土万断層・暮坂峠断層（以下、モデル2とする）、山崎断層帯主部の南東部（以下、モデル3とする）、山崎断層帯主部の南東部と草谷断層が同時に活動する場合⁷（以下、モデル4とする）、那岐山断層帯（以下、モデル5とする）を想定した。

震源断層パラメータの一覧を表1に、各ケースの震源断層の形状、アスペリティ⁸および破壊開始点の位置を図2-1～2-3に示す。モデル1については、震源断層が長大であるため、アスペリティを3つとした。アスペリティの位置については、「長期評価」により平均的なずれの速度が比較的大きいと推測された大原断層に対応する断層帯北西部に大きいアスペリティ（第1アスペリティ）を、上下方向の平均的なずれの速度から活動性が比較的高いと推定される安富断層に対応する断層帯中央部と、平均的なずれの速度が比較的大きいと推測された琵琶甲断層に対応する断層帯南東部に同規模の小さいアスペリ

⁴ 地震調査委員会(2003a)：山崎断層帯の評価（平成15年12月10日公表）。

⁵ 地震調査委員会(2005)：長期評価における確率値の更新と活断層の地震規模の表記について（平成17年1月12日公表）。

⁶ 「長期評価」においては、「山崎断層帯主部全体が運動して活動する場合の地震発生確率は、北西部と南東部それぞれの地震発生確率を超えないと考えられる。」としている。

⁷ 「長期評価」において、兵庫県(2001)が、琵琶甲断層、三木断層（山崎断層帯主部の南東部）と草谷断層が同時に活動した可能性を指摘している点について触れていることによる。

⁸ 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大きい領域）。

ティ（第2、第3アスペリティ）を配置した（ケース1-1）。破壊開始点は、地盤増幅効果に加えてディレクティブティ効果⁹により、瀬戸内海沿岸地域で揺れが大きくなると予想されるケースとして、第1アスペリティの北西端の下隅に設定した。また、「レシピ」の改良という観点から、長大な震源断層に対する震源断層パラメータの設定方法について検討することを目的として、さらに、3ケース（ケース1-2、1-3、1-4）¹⁰を試行ケースとして想定した。モデル2については、震源断層の面積が比較的大きいため、アスペリティを2つとし、大原断層に対応する断層帯北西部に大きいアスペリティ（第1アスペリティ）を、暮坂峠断層の北西端部に小さいアスペリティ（第2アスペリティ）を配置した。破壊開始点は、第1アスペリティの北西端の下隅（ケース2-1）と、第2アスペリティの南東端の下隅（ケース2-2）の2ケースとした。モデル3については、震源断層の面積が比較的小さいため、平均的なずれの速度が比較的大きいと推測された琵琶甲断層に対応する断層帯中央部にアスペリティを配置し、破壊開始点は、モデル1と同様の観点から、アスペリティの北西端の下隅とした。モデル4については、モデル3と同様に、山崎断層帯主部の南東部の中央部に大きいアスペリティ（第1アスペリティ）を、草谷断層の草谷付近のトレンチ調査結果等を参考に、断層の北東端部に小さいアスペリティ（第2アスペリティ）を配置した。破壊開始点は、過去に2つの断層（帯）が同時に活動した可能性がある¹¹ことから、第2アスペリティの北東端の下隅とした¹²。モデル5については、震源断層の面積が比較的小さく、アスペリティの位置を設定するための情報に乏しいことから、平均的なケースとして、断層帯中央部にアスペリティを配置し、破壊開始点をアスペリティの中央下端とした。

2 用いた地下構造モデル

地震波は、一般的には震源断層から上部マントル層を含む地下を伝わり、次第に減衰していく。しかし、地震基盤¹³から上の工学的基盤¹⁴までの地盤構造（以下「深い地盤構造」という）の影響、および工学的基盤から地表付近に分布する表層地盤（以下「浅い地盤構造」という）のごく地域的な影響により増幅される。このため、山崎断層帯の震源断層を含む強震動評価を行う範囲において、これらの地下構造モデルを作成した。「深い地盤構造」に対する地下構造モデルの作成にあたっては、各種物理探査結果、ボーリング調査および物理検層の結果、地質資料等の情報収集、整理を行った。次に地質構造（地層の平面及び深さ分布）をモデル化し、これと速度層構造との対比を行った上で三次元地下構造モデルを作成した。この結果（図3参照）によると、大阪平野から大阪湾内、中央構造線断層帯周辺、および兵庫県北部で地震基盤の深い地域が見られる。また、これらの地域を除くと、評価範囲の「深い地盤構造」は非常に薄く、固い地盤構造となっている。一方、「浅

⁹ 断層破壊がS波の伝播速度に近い速度で伝播することにより、破壊の進行方向では地震波が重なりあい、結果としてその振幅が大きくなる（パルスが鋭くなる）効果。一方、破壊の進行と逆の方向では、地震波は重なり合わず、その振幅は大きくならない。

¹⁰ セグメントを2つとするケース（ケース1-2）、アスペリティの総面積を震源断層全体の面積の約22%とするケース（ケース1-3）、アスペリティの総面積を震源断層全体の面積の約22%、震源断層全体の平均応力降下量を3.1MPaとし、震源断層全体の平均応力降下量とアスペリティの応力降下量の理論式からアスペリティの応力降下量を推定するケース（ケース1-4）を想定した。評価文では、ケース1-1の結果のみを示す。震源断層パラメータの詳細な設定方法や、その他のケースの結果については、説明文を参照。

¹¹ 兵庫県(2001):『平成12年度地震関係基礎調査交付金 山崎断層帯に関する調査成果報告書』, 103.

¹² モデル3において破壊開始点をアスペリティの南東下端に配置した場合に、震源断層モデルの北西延長に位置する評価領域で推定される強震動は、同領域におけるモデル4の結果にほぼ相当すると考えられる。

¹³ S波速度3km/s程度の堅硬な岩盤。

¹⁴ 建築や土木等の工学分野で構造物を設計するとき、地震動設定の基礎とする良好な地盤のことで、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、300m/s~700m/s程度である。

い地盤構造」の地下構造モデルについては、地盤調査データが乏しいことからモデルを作成せず、地形分類に基づいて経験的に算定される増幅率を用いて概略評価している。これにより求めた「浅い地盤構造」による最大速度の増幅率（図4参照）から、瀬戸内海沿岸部、岡山平野や大阪平野周辺、鳥取平野等で増幅率が高い地域が見られる。

3 予想される強震動

設定した震源断層モデルと地下構造モデルに基づき、評価範囲について、約1km四方のメッシュで強震動予測を行った。図5-1に、モデル1のうち、ケース1-1の地表における震度分布図を示す。大原断層、土万断層、および山崎断層帯主部の南東部の震源断層近傍では、概ね震度6弱～震度5強と予測された。ただし、安富断層周辺では、断層近傍でも震度5強に留まっている。また、姫路市東部から三木市にかけて、および神戸市の沿岸地域でも震度6弱が予測された。図5-2に、モデル2の地表における震度分布図（ケース2-1、2-2）を示す。ケース2-1では、ケース1-1とほぼ同様の傾向を示すが、山崎断層帯主部の南東部が含まれないため、同断層帯の周辺では、震度5強～震度5弱と予測された。ケース2-2では、震源断層周辺の震度分布についてはケース2-1との大きな差異は見られない。震源断層からやや離れた鳥取県西部の倉吉平野周辺では、ディレクティビティ効果と「深い地盤構造」、「浅い地盤構造」における地震波の増幅により、概ね震度5強～震度5弱、ごく一部で震度6弱が予測された。一方、神戸市の沿岸では、破壊進行方向と逆方向に位置するため、震度5弱～震度4に留まった。図5-3に、モデル3（上図）、モデル4（下図）の地表における震度分布図を示す。モデル3では、震源断層近傍において、概ね震度6弱が予測された。また、高砂市、加古川市等の一部の地域で震度6強以上、神戸市の沿岸地域でも震度6弱が予測された。モデル4では、震源断層近傍で概ね震度6弱、姫路市、高砂市、加古川市、加西市等の一部の地域で震度6強以上が予測された。モデル3で震度6弱が予測された神戸市の沿岸地域では、破壊進行方向と逆方向に位置しているため、概ね震度5強に留まった。図5-4に、モデル5の地表における震度分布図を示す。アスペリティの直上、およびその南側で概ね震度6弱～震度5強が予測された。なお、これまでの他の地震での評価結果と比較すると、想定した地震規模に比べて、震源断層周辺の震度がやや小さくなっている。これは、震源断層周辺の地盤が非常に固く、地震基盤と地表間での地震波の増幅が小さかったためである。

強震動予測結果の検証として、震源断層からの最短距離と最大速度の予測結果との関係を既存の距離減衰式(司・翠川, 1999)¹⁵と比較した(図6参照)。強震動予測結果は、ケース1-1、2-1、2-2については、断層近傍で全体的に小さ目の評価となっている。また、ケース2-2では、震源断層からの最短距離で70km～100kmにおいて、距離減衰式を大きく上回る地点が見られるが、これは、ディレクティビティ効果等の影響によるものと推察される。その他のケースは、全体的に距離減衰式と良い対応を示している。

なお、計算手法の検証としては、ここで用いた手法と同様の手法により兵庫県南部地震の強震動評価(地震予知総合研究振興会, 1999)¹⁶および鳥取県西部地震の強震動評価(地

¹⁵ 司宏俊・翠川三郎(1999):断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集,第523号,63-70.

¹⁶ 地震予知総合研究振興会地震調査研究センター(1999):平成10年度科学技術庁委託「強震動評価手法のレビューと事例的検討」報告書,603-715.

震調査委員会強震動評価部会, 2002)¹⁷を行っており、それぞれの評価結果が震度分布や観測記録を説明できることを確認している。

4 今後に向けて

個々の断層帯について想定したアスペリティや破壊開始点の位置は、必ずしも確定的なものではない。モデル1～3では、破壊開始点の位置が確定的に扱えなかった。そこで、モデル1、モデル3では、地盤増幅効果に加えてディレクティブティ効果により、瀬戸内海沿岸地域で揺れが大きくなると予想される位置に破壊開始点を設定した。モデル2では複数のケースを想定した。また、モデル5では、アスペリティや破壊開始点の位置、傾斜角や断層の種類についての情報が得られなかったので、平均的なケースを想定した。より信頼性の高い強震動予測を行うためには、例えば、深部構造探査等、これらの震源断層パラメータをより正確に推定するための継続的な調査研究が必要である。

アスペリティや破壊開始点の位置は、地表の地震動に大きな影響を与えることが報告されている(地震調査委員会, 2003b¹⁸, 2003c¹⁹, 2004a²⁰)。本報告でも、モデル2に対して2ケースを想定し、破壊開始点の違いが強震動予測結果に与える影響について検討した。また、モデル3において破壊開始点をアスペリティの南東下端に配置した場合に、震源断層モデルの北西延長に位置する評価領域で推定される強震動は、モデル4で得られる結果にほぼ相当すると考えられるため、これらの領域について、両モデルの強震動予測結果を比較した。アスペリティと破壊開始点の位置等、情報の不足等により現状において確定的に扱えない震源断層パラメータに対しては、このような震源断層パラメータによる強震動予測結果のばらつきの大きさを把握しておくことが、強震動予測結果に対する評価・判断を行う上では非常に重要である。

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するレシピの改良を目的として、モデル1に対して、別途3ケースを想定し、強震動予測を試行的に実施した。その結果、ケース1～4では、長大な断層に対しても、既往の研究と同程度の応力降下量が推定でき、レシピに従った結果と同程度の強震動予測結果が得られた(説明文参照)。ただし、ケース1～4で用いた震源断層全体の平均応力降下量3.1MPaは、その適用範囲や適用条件について十分な検討が行われていない²¹。また、セグメント分けについては、例えば、栗田(2004)²²、遠田(2004)²³によるカスケード地震モデル等、新しいモデルが提案されているが、現時点では研究段階にある。以上のように、長大な断層に対する震源断層のモデル化やパラメータの設定方法については、調査研究に必要なデータが不足していることもあり、研究途上の段階にある。今後はそれらの研究成果を取り入れながら、ここで検討した方法の検証も行うことにより、レシピの改良を進めていく必要がある。

また、より精度の高い強震動予測を行うためには、中小地震観測記録を用いた手法や深部地盤構造探査などにより、今後さらに地下構造(「深い地盤構造」、および「浅い地盤構造」)に関する情報を充実させ、詳細な地下構造モデルを構築していく必要がある。

¹⁷ 地震調査委員会強震動評価部会(2002): 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について

¹⁸ 地震調査委員会(2003b): 森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価(平成15年3月12日公表、平成15年3月20日訂正)

¹⁹ 地震調査委員会(2003c): 布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価(平成15年7月31日公表)

²⁰ 地震調査委員会(2004a): 琵琶湖西岸断層帯の地震を想定した強震動評価(平成16年6月21日公表)

²¹ 入倉次郎(2004): 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 47A.

²² 栗田泰夫(2004): 活断層から発生する地震規模の予測手法に関する諸問題, 月刊地球, 号外No. 46, 163-167.

²³ 遠田晋次(2004): 断層セグメントの多重破壊とスケーリング則, 月刊地球, 号外No. 46, 168-174.

表 1 山崎断層帯の震源断層パラメータ

パラメータ	モデル1				モデル2		モデル3	モデル4	モデル5
	ケース1-1	ケース1-2	ケース1-3*	ケース1-4*	ケース2-1	ケース2-2			
断層総面積	1440	900	1440	1440	936	540	792	832	
地震モーメント	1.2E+20	7.9E+19	1.2E+20	1.2E+20	4.9E+19	1.6E+19	3.5E+19	3.9E+19	
地震規模	7.3	7.3	7.3	7.3	7.1	6.7	7.0	7.0	
短周期レベル	2.6E+19	2.0E+19	-	-	1.9E+19	1.3E+19	1.7E+19	1.8E+19	
基準点の位置	(北西端-屈曲点1-屈曲点2-南東端)	(北西端-屈曲点1-屈曲点2-南東端)	(北西端-屈曲点1-屈曲点2-南東端)	(北西端-屈曲点1-屈曲点2-南東端)	(北端)~(南端)	(北西端)~(南東端)	(北西端)~(屈曲点)~(南西端)	(西端)~(東端)	
基準点の北緯	34° 58' ~34° 53' ~34° 47'	35° 07' ~34° 53' ~34° 47'	35° 08' ~34° 53' ~34° 47'	35° 08' ~34° 53' ~34° 47'	35° 08' ~34° 53'	34° 58' ~34° 47'	34° 58' ~34° 47'	35° 07' ~35° 09'	
基準点の東経	134° 16' ~134° 43' ~135° 00'	133° 54' ~134° 13' ~135° 00'	134° 16' ~134° 43' ~135° 00'	134° 16' ~134° 43' ~135° 00'	134° 16' ~134° 43'	134° 45' ~135° 00'	134° 45' ~135° 00'	133° 54' ~134° 13'	
走向	N60° W~N80° W	N60° W~N80° W	N60° W~N80° W	N60° W~N80° W	N60° W	N50° W	N50° W(山崎南東部) N60° E(草谷)	N80° W	
傾斜角	ほぼ垂直	ほぼ垂直	ほぼ垂直	ほぼ垂直	ほぼ垂直	ほぼ垂直	ほぼ垂直	(45° N)	
平均滑り量	247.8	270.7	247.8	247.8	161.1	92.9	136.3	143.2	
滑り方向	左横ずれ断層	左横ずれ断層	左横ずれ断層	左横ずれ断層	左横ずれ断層	左横ずれ断層	左横ずれ断層	北側隆起の断層(逆断層)	
地震発生層深さ	3~21	3~21	3~21	3~21	3~21	3~21	3~21	3~21	
断層面の長さ	地表約80km (大原・土方・安富・琵琶甲・三木断層)	地表約50km (大原・土方・安富断層)	地表約80km (大原・土方・安富・琵琶甲・三木断層)	地表約80km (大原・土方・安富・琵琶甲・三木断層)	地表約50km (山崎断層北西部: 大原・土方・草谷断層)	地表約30km (山崎断層南東部: 琵琶甲・三木断層)	地表約30km (山崎断層南東部: 琵琶甲・三木断層)	地表約32km	
断層面の幅	18	18	18	18	18	18	18	26	
断層面積	1440	900	1440	1440	936	540	792	832	
地震モーメント	5.6E+19	4.8E+19	2.9E+19	2.9E+19	2.2E+19	7.0E+18	1.4E+19	2.2E+19	
面積	296.7	247.3	154.8	154.8	191.9	115.7	146.5	237.9	
平均滑り量	580.6	599.9	580.6	580.6	357.0	185.9	302.1	286.4	
静的応力降下量	12.6	12.5	24.2	24.2	13.7	14.7	13.9	13.7	
短周期レベル	1.8E+19	1.7E+19	-	-	1.6E+19	1.3E+19	1.4E+19	1.8E+19	
地震モーメント	2.0E+19	1.7E+19	1.0E+19	1.0E+19	7.8E+18	-	5.1E+18	-	
面積	148.4	123.6	77.4	77.4	95.9	-	73.2	-	
平均滑り量	410.6	424.2	410.6	410.6	252.4	-	213.6	-	
静的応力降下量	12.6	12.5	24.2	24.2	13.7	-	13.9	-	
短周期レベル	1.3E+19	1.2E+19	-	-	1.1E+19	-	1.0E+19	-	
地震モーメント	2.0E+19	1.7E+19	1.0E+19	1.0E+19	-	-	-	-	
面積	148.4	123.6	77.4	77.4	-	-	-	-	
平均滑り量	410.6	410.6	410.6	410.6	-	-	-	-	
静的応力降下量	12.6	12.5	24.2	24.2	-	-	-	-	
短周期レベル	1.3E+19	1.4E+19	6.6E+19	6.6E+19	1.9E+19	-	1.6E+19	-	
地震モーメント	2.0E+19	1.4E+19	6.6E+19	6.6E+19	1.9E+19	9.3E+18	1.6E+19	1.8E+19	
面積	846.5	529.1	1130.4	1130.4	648.2	424.3	572.3	594.1	
平均滑り量	74.1	80.9	179.9	179.9	89.4	67.6	84.0	85.8	
実効応力	1.4	2.6	1.6	3.9	2.6	3.5	2.8	2.9	
アスペリティの位置	第1: 北西(山崎断層帯主部北西部)、第2: 北西(安富断層)、第3: 中央(山崎断層帯主部南東部)								
アスペリティの深さ	中								
破壊開始点の位置	第1アスペリティの北西下端								
破壊様式	同心円状								
破壊伝播速度	2.5 (Vs=3.46km/sの72%)								
fmax	6								
震源時間間数	中村・宮武(2000)による								
アスペリティの位置	第1: 中央(山崎断層帯主部南東部) 第2: 北西(草谷断層)								
アスペリティの深さ	中								
破壊開始点の位置	第2アスペリティの北西下端								
破壊様式	同心円状								
破壊伝播速度	2.5 (Vs=3.46km/sの72%)								
fmax	6								
震源時間間数	中村・宮武(2000)による								

* レンビの改良の観点から試行的に検討したケース。強震動評価結果については、説明文に最大速度分布を示す。