

島崎邦彦氏の問題提起と2016年6月改訂新レシピは 原発基準地震動の根本改定を求めている

大阪府立大学名誉教授 長沢啓行 (生産管理システム)

1 島崎邦彦氏の問題提起

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏の問題提起は、大飯原発の地震動評価の見直しにつながった。これが意味のある見直しとなるためには、6月10日改訂の新レシピが取り入れられねばならない。両者が正当に考慮されれば、断層モデルによる地震動評価結果は、例外なく、大きく引き上げられることは必至であり、基準地震動の見直しは避けられない。ここでは次のことを明らかにする。

大飯原発では、断層モデルによる地震動評価結果が、修正レシピで1.5倍強へ引き上げられ、1,260ガルのクリフエッジをも超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

伊方原発では、54kmモデルの地震動評価結果が修正レシピで1.6倍強、69kmモデルでは2.0倍以上へ引き上げられ、855ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

高浜原発では、修正レシピで1.5倍強へ引き上げられ、基準地震動 Ss-1 を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しが避けられない。

島根原発では、修正レシピをそのまま適用すると断層面積が過大になるため、旧原子力安全委員会と同様に断層幅の拡大に限定して適用すれば、長さ25kmの宍道断層の地震動評価結果は1.5倍強になり、1,014ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

川内原発では、島根原発と同様に修正レシピを断層幅の拡大に限定して適用すれば、約25kmの市来断層帯市来区間の地震動評価結果は約1.6倍になり、基準地震動 Ss-1 を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しは避けられない。

どの原発においても、断層モデルによる地震動評価見直しで、耐専スペクトルとの大きな差が消え去る。これが今回の見直しの核心である。その結果、今後クローズアップされるべき残された課題についても明らかにする。

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏は、入倉式による地震規模の過小評価を一連の学会 [40, 41, 42, 43] で次のように批判している。

垂直な横ずれ断層による M7 程度以上の地震を対象に、国内活断層に典型的な断層幅として $W = 14\text{km}$ と設定した上で、断層長さ $L[\text{m}]$ と地震モーメント $M_o[\text{Nm}]$ の関係式を次のように整理した¹。

$$(1) M_o = 4.37 \times 10^{10} \times L^2 \quad (\text{武村, 1998}) [46]$$

$$(2) M_o = 3.80 \times 10^{10} \times L^2$$

(Yamanaka & Shimazaki, 1990) [50]

$$(3) M_o = 3.35 \times 10^{10} \times L^{1.95} \quad (\text{地震調査委, 2006}) [28]$$

$$(4) M_o = 1.09 \times 10^{10} \times L^2 \quad (\text{入倉・三宅, 2001}) [13]$$

島崎氏はこれらの関係式の係数を比べて、「(4) と他との差異は顕著で、同じ断層長で比較すると、地震モーメントは4倍程度異なる。一方、同じ震源モーメントで比べれば、断層長が2倍程度異なる。」 [40, 41, 42] と批判している。

その具体例として、1891年濃尾地震、1930年北伊豆地震、2011年4月11日福島県浜通りの地震、1943年鳥取地震、1945年三河地震、1995年兵庫県南部地震を取り上げ、地震モーメントの観測値と(1)~(4)の関係式による計算値を表1のように比較し、「例は少ないが(4)を用いると地震モー

¹(1)は武村 [46] の式 $\log L = (1/2) \log M_o - 11.82$ から $M_o[\text{dyn cm}] = 10^{11.82 \times 2} L[\text{km}]^2 = 4.37 \times 10^{23} L^2$ を導き、 $1\text{Nm} = 10^7 \text{dyn cm}$ の関係を用いたもので、(2)は Yamanaka-Shimazaki [50] の式 $\log L = (1/2) \log M_o - 11.79$ を同様に变形して得た式である。(3)は松田式 $\log L[\text{km}] = 0.6M - 2.9$ (単位を変えると $\log L[\text{m}] = 0.6M + 0.1$ になる) に $M = (\log M_o[\text{dyncm}] - 17.72)/1.17$ の関係式を代入して $M_o[\text{dyn cm}] = 10^{17.72 - 0.1 \times (1.17/0.6)} L[\text{m}]^{1.17/0.6} = 10^{17.525} L^{1.95}$ を導き、 $1\text{Nm} = 10^7 \text{dyn cm}$ の関係を用いて $M_o[\text{Nm}] = 3.35 \times 10^{10} L[\text{m}]^{1.95}$ としたものであり、断層長さから松田式で求めた地震モーメントに相当する。

(4)は入倉ら (2001)[13] の式 $S = 4.24 \times 10^{-11} \times M_o^{1/2}$ で $S = LW$, $W = 14\text{km}$ と置いて变形したものである。

(1)~(3)は断層長さや地震モーメントの関係式であり、断層幅とは無関係だが、(4)は元の断層面積と地震モーメントの関係式において断層幅を14kmに固定して導かれた式であり、断層幅が変わると影響を受けるので注意が必要である。

表 1: 国内活断層による地震の地震モーメントの観測値と計算値 [$\times 10^{18}$ Nm][41, 42]

地震発生年	観測値	(1)	(2)	(3)	(4)
1891 年	180	210	180	130	52
1930 年	27	32	28	21	7.9
2011 年 ^(注)	11	17	14	11	5.5
1927 年	46	48	41	19	12
1943 年	36	39	34	18	9.8
1945 年 ^(注)	10	19	17	9	19
1995 年	24	45	39	20	11

注: 2011 年福島県浜通りの地震では傾斜角 60 度, 1945 年三河地震では傾斜角を 30 度とし, (4) 式の係数を傾斜角に応じて変えた。[41, 42]

メントが過小評価される傾向が明らかとなった」[40, 41, 42]と結論づけている。

その上で、「地震本部の強震動予測では、いわゆる改正レシピが使われており、(3)によって地震モーメントが予測され、(4)のもととなる入倉・三宅(2001)の式から断層面積が推定されている。昨年9月に発表された国土交通省の日本海における大規模地震に関する調査検討会の報告書では、日本海の『最大クラス』の地震による津波想定において、入倉・三宅(2001)の式により地震モーメントが推定されている。一方、原子力発電所の津波推定では(1)が使われている。」[40]と原子カムラでの地震動評価が地震調査研究推進本部等の評価と異なっていることを具体的に指摘し、批判している。

島崎氏による入倉式批判は、日本地球惑星科学連合 2016 年大会における 5 月 25 日の発表で 4 回になる。これらを契機として原子力規制委員会は 6 月 16 日、田中俊一委員長・石渡明委員らが島崎氏と面会し[47]、6 月 20 日の定例会議で「とりあえず大飯原発について地震動評価を行う」ことを決定した²。

この動きに耐えかねた入倉氏は自身のホームページで 6 月 22 日、コメントを発表した(6 月 24 日にこれを修正した最終版[17]を掲載している)。

²島崎氏が原子力規制委員会退職後に入倉式批判を行い始めたきっかけは、2014 年 3 月の在職中に行われた私たち市民運動との話し合い[48]であったことが注 1 のように報道されている。その際、島崎氏は「原子力規制庁に検討を指示したものの、報告はなかった」という。原子力規制庁は今回、同様の検討を原子力規制委員会本会議で指示されたわけで、もはやサボタージュすることはできないが、後述するように応力降下量の設定で過小評価し続けることのないよう見守る必要がある。

その内容は、入倉式の妥当性を主張しながら、その限界を認めるものであった。すなわち、複数地点での地震観測波形から地下の震源断層面上の不均質なすべり量を逆算(震源インバージョン)して求めた震源断層の広がり断層長さは 40~56km、断層幅 16~20km となり、「一定のばらつき(例えば 1 σ)の範囲で、スケーリング則(入倉式)に合致している」と主張する一方、国土地理院が地表での地殻変動量の分析から推定した均質な震源断層モデルは長さ約 35km、幅約 13km(一部 6.6km)であり、産業技術総合研究所が地表調査で明らかにした地震断層(地震で現われた地表のずれ)の長さは約 34km であったことから、「測地データから求めた均質な震源断層は過小評価となってしま(つまり、入倉式に合わない)、という問題があります」と認めたのである。

入倉氏の主張が仮に正しいとしても³、問題は地震観測記録がなければ前者の不均質な震源断層の広がりわからないということであり、地震が起きる前には活断層や変動地形などの測地データによって震源断層を推定する以外にないということ、これを入倉式に適用すれば地震規模が過小算定されてしまうということである。入倉氏は「活断層の調査手法として、地表の変動地形だけでなく、反射法探査や重力探査など地球物理学的手法も取り入れるなど検討する必要がある」と主張するが、現在すでに原子力規制委員会の審査でこれらの手法が使われているにもかかわらず、M7.3 の震源断層を「断層長さ 40~56km、断層幅 16~20km」と評価した例は全く存在しない。

この点について、島崎氏は 6 月 16 日の面会[47]で核心を突く発言をしている。「入倉・三宅式が正

³入倉式と松田式など他の式との違いは対象とした地震データにおける断層幅の違いにある。注 2 に詳述したとおり、断層長さ地震モーメントの関係式では入倉式の元になった北米中心の地震データは松田式にもほぼフィットするが、国内地震データより断層幅が大きい。そのため、断層面積と地震モーメントの関係では国内地震データとの間に違いが生じている。この事実は入倉ら[13]も論文中で認めていることだが、Somerville et al.(1993)[44]が指摘したように日本国内と北米等とで断層パラメータに大きな違いがあるのか、その原因は不明のままであった。今回、入倉は測地データによる地殻変動分布や地震断層分布と震源インバージョンによる滑り分布との違いで説明しようとしているが、それで説明し尽くせるのかどうかは疑問であり、これまでに蓄積された地震データについて、アスペリティ面積や応力降下量など震源パラメータ全体に関する今後一層の解明が必要である。

しいと、今言ったように幅が16kmにして断層の長さを逆に求めると57kmになる。実際の断層の長さは30km, 35kmという人もいるけれど、どう考えても57kmにはならない。とくに地震の前に57kmという人はいないはずです。活断層の長さもせいぜい30kmで、誰が好んで断層の長さを57kmと言うんでしょうか。とくに、事業者はどちらかという短い断層を好むわけで、地表の観測データから考えられるところを自ら進んで57kmという長い断層を提案する事業者は恐らくいない。ということはすなわち、今の入倉・三宅式を使っている限り、震源の大きさは過小評価される。」

このような過小評価を許さないためには、島崎氏の提案通り、入倉式以外の式を適用して地震モーメントを求める以外にないのである。これを長期的な課題だとして棚上げにすることは絶対に許されない。

2 2016年6月10日改訂の新レシピ

島崎氏の問題提起は、原子力規制委員会の重い腰を上げさせる一歩となった。しかし、これが大飯原発などで基準地震動の見直しにつながるかどうかは、もう一つの要因に依存している。

地震調査研究推進本部の地震調査委員会は2016年6月10日、「全国地震動予測地図2016年版」を公表したが、その際、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を見直している[23]。これが地震動評価を左右するもう一つの要因であり、これを考慮しなければ、島崎氏の問題提起が基準地震動の見直しにつながることはないと言ってもよい。

このレシピ改訂は「断層長さが概ね80kmを超え断層幅と平均すべり量とが飽和する活断層」と「スラブ内地震（沈み込んだ海のプレート内で発生する海溝型地震）」に対応するためのものだが、ここでは前者に限ってその重大な意義を説明する。

断層モデルによる地震動評価結果を左右するのは、「応力降下量」と「短周期レベル」である。地震モーメントが大きくなっても、それが正当にこれらの値を引き上げることに繋がらなければ、地震動評価結果は変わらない。大飯原発の場合、基

準地震動を決定しているのは、断層長さ63.5kmの「FO-A～FO-B～熊川断層」であり、通常の断層モデルのレシピによれば「断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 4.2\text{MPa}$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a = 19.0\text{MPa}$ 」となるべきところ、関西電力は長大な断層に適用されるFujii-Matsu'uraの応力降下量「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」を採用していた。仮に、入倉式ではなく松田式（島崎氏の提示した(3)の式）を適用すると、地震モーメントは約1.4倍、短周期レベルは約1.1倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 」（断層面積を変えない場合）または「 $\Delta\sigma = 4.5\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 20.6\text{MPa}$ 」（修正レシピで断層面積を変えた場合）と大きくなるが、これまで通りにFujii-Matsu'uraの応力降下量を採用すると応力降下量は変わらない。したがって、地震動評価結果はほとんど変わらないことになる。

ところが、6月10日改訂の新レシピでは、「長大な断層」の定義を明確にし、断層面積が $1,800\text{km}^2$ 以上の長大な断層でなければFujii-Matsu'uraの応力降下量を採用してはならないと明記した⁴のである。この基準によれば、「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層幅は15kmなので、120km以上でなければ「長大な断層」とは見なせず、Fujii-Matsu'uraの応力降下量をこの断層に採用してはならないことになる。つまり、結果として、「FO-A～FO-B～熊川断層」の場合、応力降下量を1.5倍ないし1.9倍に大きく引上げざるを得なくなった。断層モデルの地震動解析では、短周期レベル増大の効果も加

⁴6月10日改訂の新レシピでは、「1.1.1 巨視的震源特性」の項で、地震モーメント M_0 が $1.8 \times 10^{20}\text{N}\cdot\text{m}$ を上回る場合に、Murotani et al.(2015)の式 $M_0 = S \times 10^{17}$ を用いることとし、「1.1.2 微視的震源特性」の「(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 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\sigma_a$ 、 σ_a 、 σ_b 」の項で、Fujii and Matsu'ura(2000)による応力降下量「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.4\text{MPa}$ 」を暫定的に採用する「長大な断層」の条件をこれとの関係で明確にし、次のように注記した。

「*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、断層幅と平均すべり量とが飽和する目安となる $M_0 = 1.8 \times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ を上回る断層の地震を対象とする。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。」

$M_0 = 1.8 \times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ に対応する断層面積はMurotaniらの式から $1,800\text{km}^2$ となる（入倉・三宅(2001)の式でも同じ値になる）。入倉・三宅(2001)の対象とした地震データによれば、飽和断層の幅は16.6kmであり、 $1,800\text{km}^2$ は断層長さ108kmに相当する。

わる（修正レシピで断層面積を拡張した場合にはアスペリティ面積増大の効果がさらに加わる）が、応力降下量にほぼ比例して地震動が大きくなるため、地震動評価結果は1.5倍強ないし1.9倍になる。つまり、大飯原発では基準地震動の大幅な見直し避けられない。

原子力規制委員会・原子力規制庁は島崎氏と面会した際、この新レシピの重大さに全く気付いていなかったようだが、6月23日に提出された脱原発弁護団全国連絡会からの要請書[7]で具体的に指摘されたため、もはや無視できず、6月10日改訂の新レシピを適用せざるを得なくなったと言える。

その波紋は、大飯原発に限らない。以下では、まず、大飯原発について、「島崎氏の問題提起と新レシピの適用」が地震動評価に与える影響をより詳しく解明し、私が関係してきた高浜原発、伊方原発、島根原発、川内原発の地震動評価に即して、その波紋の大きさを解明する。

3 大飯3・4号の基準地震動への影響

2015年9月現在、原子力規制委員会の審査会合で了承された大飯3・4号の基準地震動Ss-1～19は表2の通りであり、断層モデルによる地震動評価結果とそれに基づく基準地震動Ss-2～Ss-17は図2の通りである⁵。

大飯3・4号では、「FO-A～FO-B～熊川断層」(M7.8, $X_{eq} = 11.0\text{km}$)の耐専スペクトルは1,200ガル以上になるが、等価震源距離が11.0kmと近いため適用外とされており、700ガルの基準地震動Ss-1は再稼働申請時のままで、もっぱら断層モデルによる評価が行われている。その結果が、図2であり、基準地震動Ss-2～17と灰色の波線が不確かさを考慮した全ケースの重ね書きである。

図1の「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは表4の通りであり、地震モーメントを入倉式ではなく松田式で求めると、断層モデル(入倉式)の「F-M不採用」の欄の $5.03 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ から「修正・新レシピ」の欄の $7.01 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ へ約1.4倍に

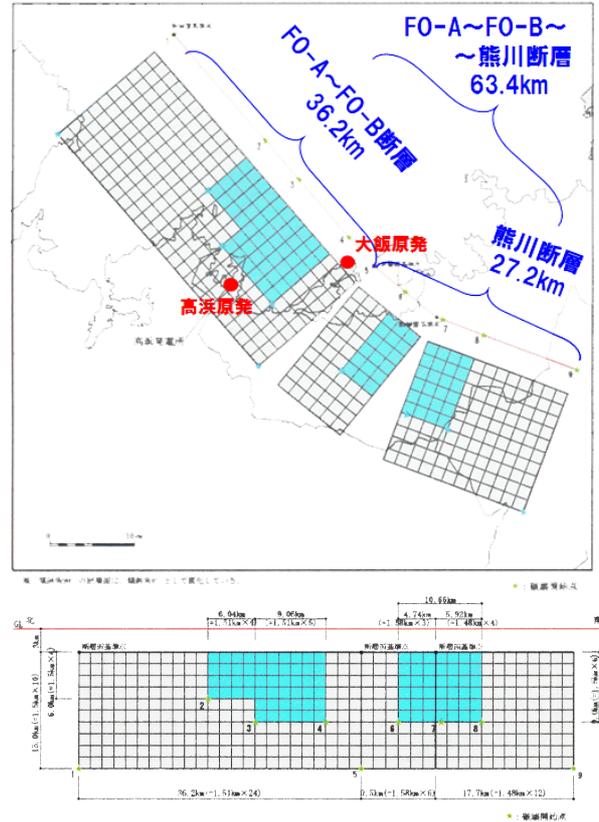
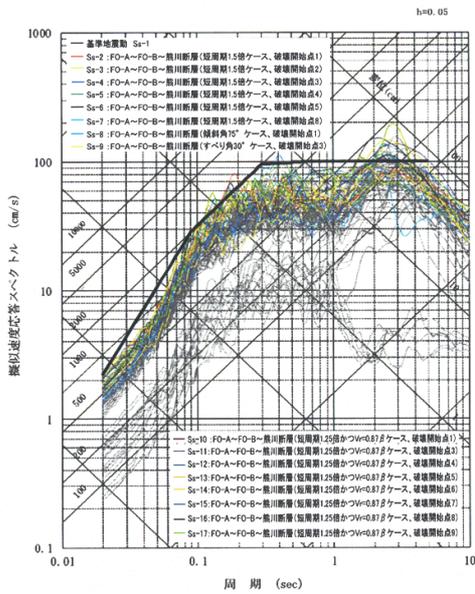


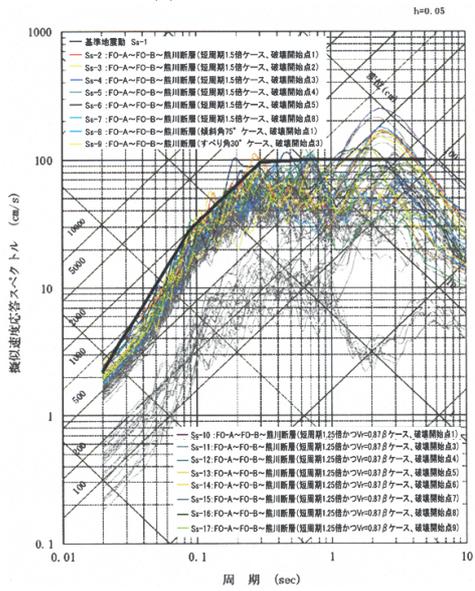
図1: 大飯3・4号と高浜3・4号における「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層モデル(上端深さ3kmの基本ケース) [25, 26]

なり、同様に、短周期レベルAは $1.96 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$ から $2.19 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$ へ約1.1倍になる。応力降下量もFujii-Matsu'uraの「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」から約1.9倍の「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約1.5倍の「 $\Delta\sigma = 4.5\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 20.6\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)へ大きくなる。断層面積を変えた場合には、アスペリティ面積も 209.22km^2 から 247.05km^2 へ約1.2倍になる。これらの結果、断層モデルによる地震動評価結果は、松田式で地震規模を評価した場合に約1.9倍、修正レシピで断層面積を拡大した場合に約1.5倍強になると推定される⁶。仮に、図2の断層モデルによる地震動評価結果が1.5倍強になれば、表2の断層モデルに基づく基準地震動Ss-2～Ss-17も1.5倍強へ大幅に引き上げられることになり、大飯3・4

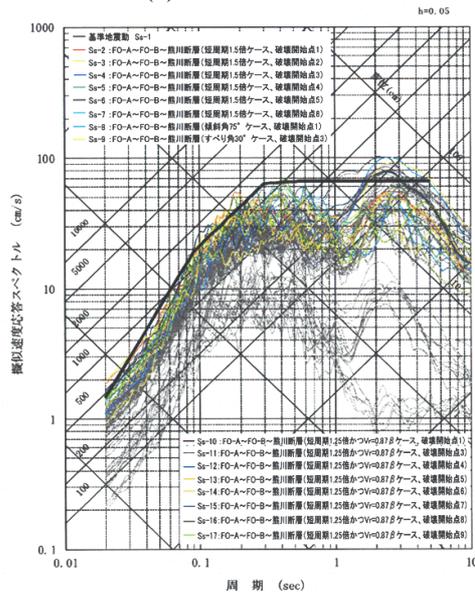
⁶大飯3・4号では、統計的グリーン関数法による断層モデルが使われており、その要素地震の応力降下量が約1.5倍、短周期レベルが約1.1倍に増やされるため、地震動評価結果も自動的に1.5倍以上になる。ただし、断層面積が拡大される修正レシピではアスペリティ面積も約1.2倍になるため、この分が地震動評価結果をさらに引き上げることになる。



(a) 水平 NS 方向

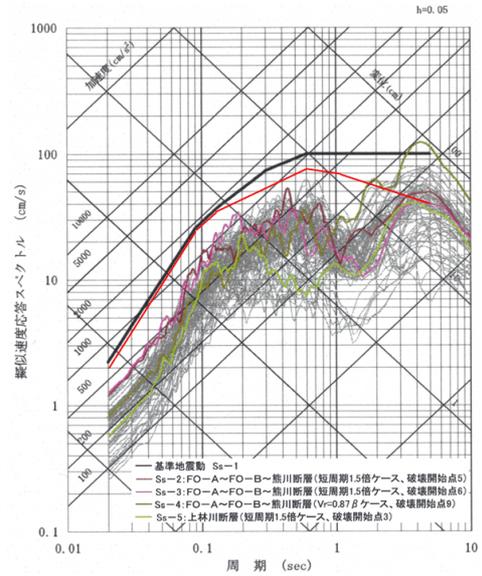


(b) 水平 EW 方向

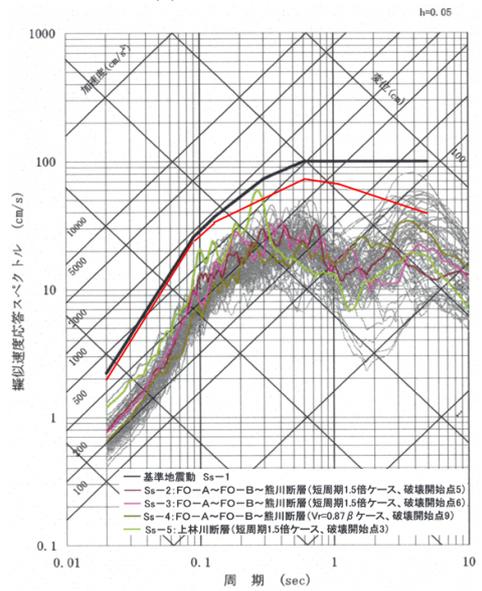


(c) 鉛直方向

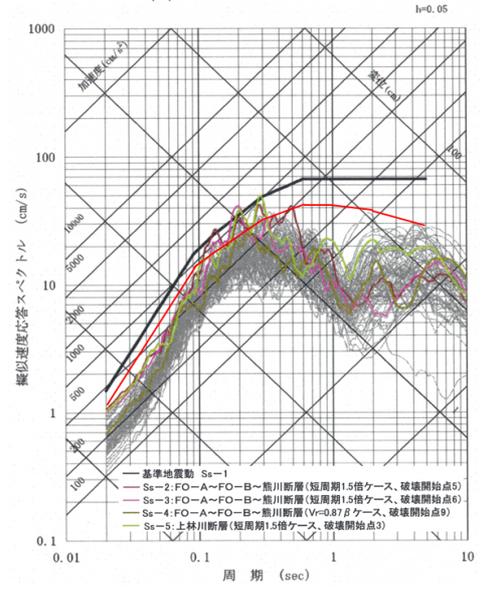
図 2: 大飯 3・4 号における「FO-A~FO-B~熊川断層」等の断層モデルによる評価結果 (灰色の全ケース重ね描き) と基準地震動 Ss-1~Ss-17 (2015 年 3 月)[26]



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図 3: 高浜 3・4 号における「FO-A~FO-B~熊川断層」等の断層モデルによる評価結果 (灰色の全ケース重ね描き) と FO-A~FO-B~熊川断層 (傾斜角 75 度) の耐専スペクトル (赤折れ線) および基準地震動 Ss-1~Ss-5 (2014 年 8 月)[25]

表 2: 大飯 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [26]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動 (距離減衰式など「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A~FO-B 断層~熊川断層の耐専スペクトルは適用外であり、距離減衰式による地震動評価に基づく)	700		468 ^{*1}
震源を特定して策定する地震動 (「断層モデルによる方法」で作成)				
Ss-2	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 1)	690	776	583
Ss-3	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 2)	496	826	383
Ss-4	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	546	856	518
Ss-5	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 4)	511	653	451
Ss-6	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	660	578	450
Ss-7	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 8)	442	745	373
Ss-8	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (傾斜角 75 度ケース, 破壊開始点 1)	434	555	349
Ss-9	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (すべり角 30 度ケース, 破壊開始点 3)	489	595	291
Ss-10	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 1)	511	762	361
Ss-11	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 3)	658	727	469
Ss-12	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 4)	495	546	334
Ss-13	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 5)	744	694	380
Ss-14	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 6)	723	630	613
Ss-15	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 7)	685	728	430
Ss-16	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 8)	677	753	391
Ss-17	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	594	607	436
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-18	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-19	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

*1: 基準地震動の応答スペクトルでは 467gal (周期 0.02 秒の応答加速度) だが、これに適合するように作成した模擬地震波の最大加速度は 468gal になるため、関西電力は 468 gal を Ss-1 の模擬地震波の最大加速度として記載している。

表 2 と表 3 を比較して明らかのように、基準地震動 Ss-1 はいずれも同じだが、大飯 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2~17 は高浜 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2~4 の 2 倍以上である。同じ「FO-A~FO-B 断層~熊川断層」に対する評価でありながら、このように大きいのは、断層との等価震源距離が高浜 3・4 号の 18.6km に対し、大飯 3・4 号は 11.0km と非常に近いからである。だとすれば、応答スペクトルによる基準地震動 Ss-1 が大飯 3・4 号では 2 倍以上にも大きく設定されて当然である。しかし、そうっていないのは、断層との等価震源距離が「極近距離」より近すぎると耐専スペクトルの適用範囲外になるという理由からだが、震源近傍の地震観測記録はここ 20 年でかなり多く取れだしており、これらに基づいて耐専スペクトルを抜本的に作り替えて適用すべきである。ちなみに、原子力規制庁によれば、日本電気協会が耐専スペクトルを現在見直し作業中とのことである。そうであればなおさら、参考値としてでも耐専スペクトルを求め、大飯 3・4 号の基準地震動 Ss-1 を大幅に引上げるべきである。その上で、バラツキを考慮すべきである。

表 3: 高浜 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [25]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動 (耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (傾斜角 75 度ケース) の耐専スペクトルによる)	700		467
震源を特定して策定する地震動 (「断層モデルによる方法」で作成)				
Ss-2	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	376	248	334
Ss-3	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 6)	396	240	313
Ss-4	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 ($V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	255	205	218
Ss-5	上林川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	180	374	320
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-6	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-7	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

表 4: 大飯・高浜原発における FO-A~FO-B~熊川断層の断層パラメータ (基本ケース) [25, 26]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)		断層モデル (入倉式) *1		修正・新レシピ *2	
		F-M 採用 (関電)	F-M 不採用	断層面積変えず	断層面積拡大
傾斜角 θ		90°			
ずれの種類		横ずれ断層			
断層長さ L		63.4 km		68.1 km	
断層幅 W		15.0 km		16.5 km	
断層面積 $S = LW$		951 km ²		1122.96 km ²	
断層上端深さ		3 km			
断層下端深さ		18 km			
破壊開始点		各アスペリティ下端 6 種類 + 断層下端 3 種類			
破壊伝播方式		同心円状 (放射状)			
地震モーメント M_0		5.03 × 10 ¹⁹ N·m		7.01 × 10 ¹⁹ N·m	
マグニチュード		M7.7, M _W 7.1		M7.8, M _W 7.2	
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		151.2 cm		210.8 cm	178.5 cm
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.5 × 10 ¹⁰ N/m ²			
S 波速度 V_s (または β)		3.6 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.59 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$		3.1 MPa	4.2 MPa	5.8 MPa	4.5 MPa
短周期レベル A		1.96 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		2.19 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$		1.61 sec		1.80 sec	
アスペリティ 全体	面積 S_a	209.22 km ²		247.05 km ²	
	地震モーメント M_{0a}	2.22 × 10 ¹⁹ N·m		3.10 × 10 ¹⁹ N·m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.1 MPa	19.0 MPa	26.5 MPa	20.6 MPa
	平均すべり量 D_a	303.9 cm		423.7 cm	358.8 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	741.78 km ²		875.91 km ²	
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	2.81 × 10 ¹⁹ N·m		3.91 × 10 ¹⁹ N·m	
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.8 MPa	3.8 MPa	5.3 MPa	4.1 MPa
	平均すべり量 D_b	108.1 cm		150.7 cm	127.7 cm
Q 値		50 $f^{1.1}$			
高周波限界遮断周波数 f_{\max}		8.3 Hz			

*1: 地震調査研究推進本部の強震動予測手法 (レシピ) では, 地震モーメント M_0 から短周期レベル A と断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求め, A の値からアスペリティ総面積 S_a を求め, S_a と断層面積 S の比 (アスペリティ面積比 S_a/S) からアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を算出している (これを「A 法」とよぶ). この A 法では, S が大きくなるほど S_a/S が大きくなり, $\Delta\sigma_a$ が小さくなるとともに, 背景領域の地震モーメントがマイナスになるなど意味をなさなくなる. そこで, レシピでは, このような場合には S_a を S の 22% に固定する方法 (以下では, 「 $S_a/S = 0.22$ 法」とよぶ) を用いることとしている. さらに, レシピでは, 長大な断層の場合には, Fujii-Matsu'ura(2000) の $M_0 - (L, W)$ 関係式から導かれた $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を使い, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22 = 14.4\text{MPa}$ (上表では 14.1 となっているが, 原本での数値の丸め誤差による) と算出して用いることを推奨している. 関西電力は, 「FO-A~FO-B」の 35.3km モデルでは A 法 ($S_a/S = 0.248$) を使い, 熊川断層との連動 63.4km モデル (A 法では $S_a/S = 0.366 > 0.30$) では 「 $S_a/S = 0.22$ 法」を使い, さらに Fujii-Matsu'ura(2000) で上表の「F-M 採用 (関電)」の欄のように応力降下量を小さく設定している. 問題はどの長さ以上を「長大な断層」とみなすかだが, 推本の「活断層の長期評価手法 (暫定版)」報告書 (2010.11.25) では「長さが 100km を超えるような長大な断層」(p.6) とし, 2014 年 12 月の「全国地震動予測地図 2014 年版」付録もスケリング則に沿った震源のモデル化との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」としていたが, レシピの中には明記されていなかった. 2016 年 6 月改訂の新レシピはこれを明記し, 地震モーメントが $M_0 > 1.8 \times 10^{20}\text{N}\cdot\text{m}$, すなわち, 断層面積 1,800km² 以上で適用することと明記し, 断層面積 951km² の「FO-A~FO-B~熊川断層」には到底適用できないことが明白になったのである. 入倉式で地震規模が過小設定されていても, Fujii-Matsu'ura(2000) の応力降下量を使わなければ, 「F-M 不採用」の欄のように, アスペリティ平均応力降下量は 19.0MPa になる.

*2: 修正レシピでは, 断層長さから松田式で地震規模を M7.8 と求め, 地震モーメント $M_0 = 7.01 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ を算出し, これに相当する断層面積 $S_{\text{model}} = 1122.96\text{km}^2$ を入倉式から求め, 断層長さとして断層幅を少し拡大して, この面積に近づけるが, 長さで 5km, 幅で 2km を上限としている. ここでは, 幅を 1.5km 拡張して $W_{\text{model}} = 16.5\text{km}$ とし, $L_{\text{model}} = S_{\text{model}}/W_{\text{model}}$ で長さを求めた. 参考のため, 断層面積を拡張しなかった場合を「断層面積変えず」の欄に記載した. 実際には断層モデルのメッシュの整数倍で断層の長さとして幅が決められるため, 応力降下量は両者の中間の値になる.

号の 1,260 ガルのクリフエッジを間違いなく超えるであろう。

それは別段、驚くべきことではない。大飯 3・4 号で適用外にされた「FO-A～FO-B～熊川断層」(M7.8, $X_{eq} = 11.0\text{km}$) の耐専スペクトルを採用しておれば、基準地震動が 1,200 ガル以上に設定されたはずだからである。元来、耐専スペクトルでも断層モデルでも、それらが正しく評価されていれば、同程度の結果になるはずであり、今回の検討はそれを裏付けたにすぎない。

原子力規制委員会は 6 月 20 日定例本会議の場で、島崎氏の問題提起に基づき、大飯原発について入倉式以外の松田式等で評価し直すよう原子力規制庁に指示したが、6 月 10 日改訂の新レシピを採用する限り、このような結果にならざるを得ない。

4 高浜 3・4 号の基準地震動への影響

島崎氏の問題提起と新レシピの適用がもたらす高浜 3・4 号の基準地震動への影響は、大飯 3・4 号の場合とは少し異なる。

高浜 3・4 号の基準地震動 Ss-1～7 は表 3 の通りであり、断層モデルによる地震動評価結果とそれに基づく基準地震動 Ss-2～Ss-5 は図 3 の通りである⁷。この図 3 には、「FO-A～FO-B～熊川断層（傾斜角 75 度）」の耐専スペクトル（内陸補正なし）が赤折れ線で描かれており、断層モデルによる水平 NS 方向と水平 EW 方向の地震動評価結果はこの耐専スペクトルの 1/3～1/2 にすぎないことがわかる。断層モデルによる地震動の過小評価がここに如実に現れており、その原因は、先に示したとおり、入倉式で地震規模を過小評価し、長大な断層に適用すべき Fujii-Matsu'ura の小さな応力降下量を無理矢理適用しているからにはほかならない。島崎氏の問題提起によって前者が是正され、新レシピの適用によって後者が是正される。その結果、「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは大飯 3・4 号と同様に表 4 の「修正・新レシピ」の欄のようになり、地震動評価結果は、大飯 3・4 号と同様に松田式で地震規模を評価した場合に約 1.9 倍、

⁷図 3 には上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果も含まれる。なお、図 3 には「震源を特定せず策定する地震動」に関係した基準地震動 Ss-6 と Ss-7 は含まれていない。

修正レシピで断層面積を拡大した場合に約 1.5 倍強になると推定される⁸。

仮に、地震動評価結果が約 1.5 倍強になった場合には、表 3 の基準地震動 Ss-2～Ss-4 も約 1.5 倍強へ大幅に引き上げられるが、水平方向では 700 ガルの Ss-1 を一部の周期帯で超えることはあっても、大幅に超えることはない。しかし、鉛直方向では 467 ガルの Ss-1 をかなり超え、0.1～0.3 秒の周期帯で大きく超えることになる。つまり、高浜 3・4 号でも、基準地震動の見直しは避けられない。

高浜 3・4 号の基準地震動については、ここで検討した断層モデルによる地震動の過小評価だけでなく、次のような事柄も検討しなければならない。

(i) 耐専スペクトルには最近 20 年間の地震観測記録が反映されておらず、平均像そのものが過小評価に陥っていること、また、(ii) 「平均+標準偏差」が平均の 2 倍になるほどの偶然的不確かさが耐専スペクトルや断層モデルで考慮されておらず、実際の地震動を過小評価していること、さらに、(iii) 「震源を特定せず策定する地震動」では M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こることが原子力安全基盤機構 JNES によって解析されており、2016 年熊本地震の 4 月 14 日に起きた M6.5 前震の益城観測点での地下地震観測記録がそれを裏付けていること [49] である。これらについてはこれ以上は触れず、別稿に譲る [34]。

5 伊方 3 号の基準地震動への影響

四国電力による 2013 年 7 月の伊方 3 号再稼働申請時には、敷地前面海域の 54km モデルが基本震源モデルであり、不確かさの検討として 130km 連動モデルが採用され、モデルの妥当性確認のために 430km までのモデルが評価されていた。しかし、原子力規制委員会の審査会合で 480km モデル、130km モデル、54km モデルの 3 種類をすべて基本震源モデルとするよう迫られ、四国電力はそれに従わざるをえなかった。

結局、基本震源モデルは 2013 年 7 月申請時か

⁸高浜 3・4 号の場合も統計的グリーン関数法による断層モデルが用いられており、要素地震の応力降下量が約 1.5 倍に増やされるため、地震動評価結果も自動的に 1.5 倍になる。これにアスペリティ面積増大効果が付け加わり、約 1.5 倍強になる。

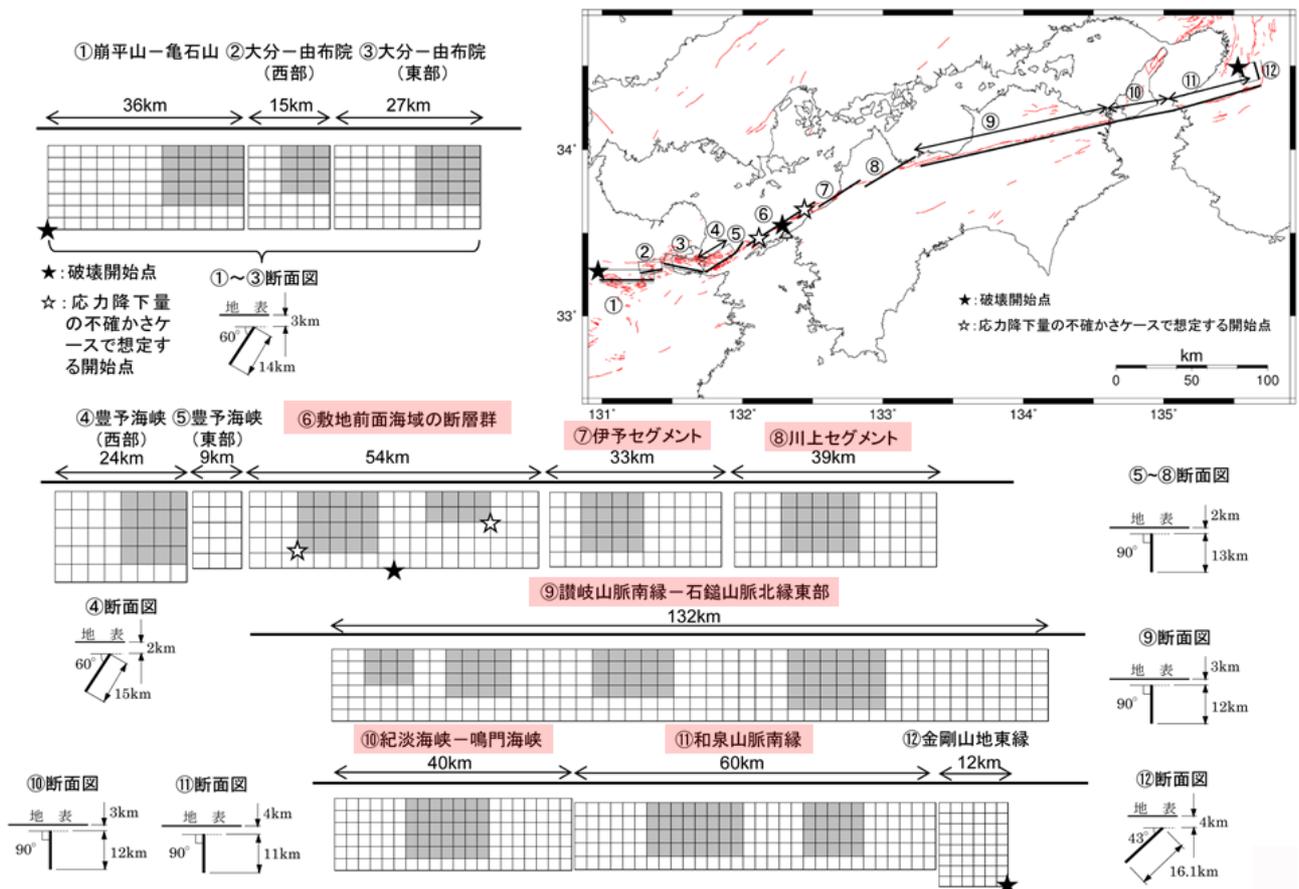


図 4: 伊方 3 号における敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 基本震源モデル [37]

表 5: 伊方 3 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [37, 38]

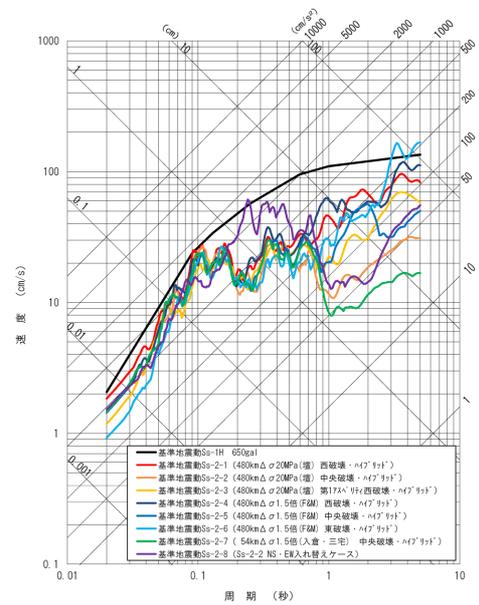
基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動（耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波（敷地前面海域の断層群 69km(傾斜角 30 度ケース)の耐専スペクトルによる）	650		377
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2-1	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・西破壊	579	390	210
Ss-2-2	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・中央破壊	456	478	195
Ss-2-3	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ 壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・第一アスペリティ西破壊	371	418	263
Ss-2-4	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・西破壊	452	494	280
Ss-2-5	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・中央破壊	452	388	199
Ss-2-6	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・ Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・東破壊	291	360	201
Ss-2-7	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）54km・ 入倉・三宅の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・中央破壊	458	371	178
Ss-2-8	Ss-2-2 の NS と EW の入れ替え	478	456	195
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-3-1	2004 年北海道留萌支庁南部地震 M6.1 の解放基盤波	620		320
Ss-3-2	2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム（監査廊）の観測記録	528	531	485

ら大きく変わり、「図4の480km」,「図4⑥~⑧の130km」,「図4⑥の54km」という3種類の敷地前面海域断層群(中央構造線断層帯)が設定された。これに伴い、地震動評価手法も、壇ら(2011)の手法[9]が3種類の基本モデルに一貫して採用され、480kmと130kmにはFujii-Matsu'ura(2000)の手法[10], 54kmには入倉・三宅(2001)の手法[13]も併用された。こうして、表5および図5の基準地震動が策定された。

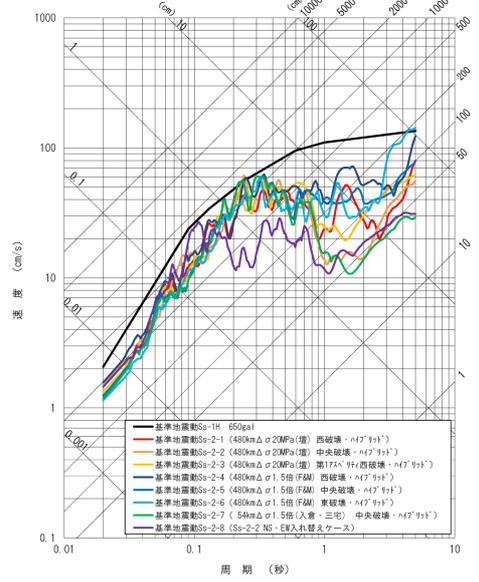
伊方3号の場合でも、54km, 69km, 130kmの鉛直ケースの耐専スペクトルは等価震源距離が小さすぎるため適用外とされ、断層モデルによる地震動評価結果が基準地震動Ss-2-1~Ss-2-8を占めており、入倉・三宅の手法による評価結果もSs-2-7として入っている。実は、Ss-2-7の破壊開始点を「西下端破壊ケース」とした場合も鉛直方向でSs-1を超えるが、Ss-2-4に包絡されるため基準地震動には含まれていない。

島崎氏の問題提起と新レシピの適用によって、断層モデルによる地震動評価結果がどのように変わるかは表6から推定できる。表6の「断層モデル(入倉式)」の「F-M採用(四電)」が四国電力による54km基本ケースの断層パラメータであり、「F-M不採用」の欄が新レシピを適用してFujii-Matsu'uraの応力降下量を使わない場合であり、「修正・新レシピ」の欄が松田式で地震規模を求め、断層面積を拡大する修正レシピを採用し、F-Mを採用しない新レシピを適用した場合である。これより、「修正・新レシピ」では、地震モーメントは約2.0倍、短周期レベルは約1.2倍になり、応力降下量もFujii-Matsu'uraの「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 14.4\text{MPa}$ 」から約2.2倍の「 $\Delta\sigma = 7.0\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 31.9\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約1.6倍の「 $\Delta\sigma = 5.0\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 22.5\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)と大きくなる⁹。断層面積を変えた場合にはスペリティ面積も約1.3

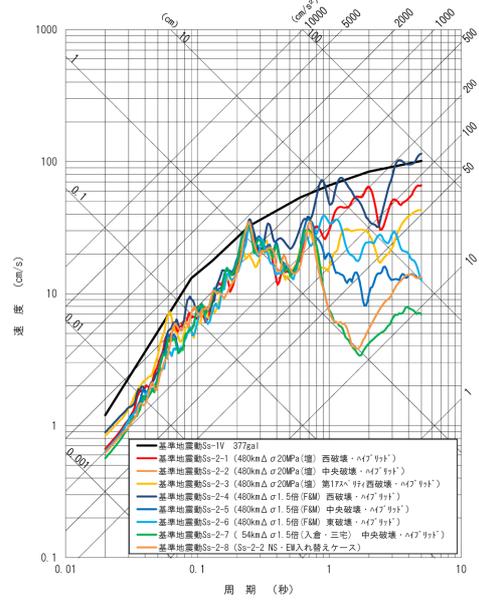
⁹Fujii-Matsu'uraのアスペリティ平均応力降下量が $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ ではなく、 14.4MPa になっているのは、アスペリティ面積比 S_a/S を大飯・高浜原発ではレシピ通りに0.22としているのに対し、伊方原発では原論文から0.215としているためである。断層面積を変えない場合には 31.9MPa と極めて大きいですが、国内で観測されているM7クラスの地震では注2(iv)に示したとおり、 $\Delta\sigma_a = 20 \sim 30\text{MPa}$ であり、異常とまでは言えない。ちなみに、海洋プレート間地震では $\Delta\sigma_a = 40 \sim 50\text{MPa}$ の応力降下量は通常レベルの大きさである。



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図5: 伊方3号における応答スペクトルによる基準地震動Ss-1と中央構造線断層帯の断層モデルによる基準地震動Ss-2-1~Ss-2-8[37]

表 6: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の断層パラメータ [37]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)		断層モデル (入倉式) *1		修正・新レシピ *2	
		F-M 採用 (四電)	F-M 不採用	断層面積変えず	断層面積拡大
傾斜角 θ		90 度 (右横ずれ断層)			
断層長さ L		54.0 km		59.0 km ²	
断層幅 W		13.0 km		15.0 km	
断層面積 $S = LW$		702.0 km ²		885.0 km ²	
断層上端深さ		2 km			
断層下端深さ		15 km		$W_{\text{model}}=17$ km	
地震モーメント M_0		2.74×10^{19} N·m		5.36×10^{19} N·m	
マグニチュード		M7.5 (M7.3 : 四電), M_W 6.9		M7.7, M_W 7.1	
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		118 cm		230.6 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.31×10^{10} N/m ²			
S 波速度 V_s (または β)		3.5 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.5 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$		3.1 MPa	3.6 MPa	7.0 MPa	5.0 MPa
短周期レベル A [N·m/s ²]		1.65×10^{19}	1.60×10^{19}	2.00×10^{19}	
アスペリティ 全体	面積 S_a [km ²]	150.9 (0.215)	154.4 (0.22)	194.7 (0.22)	
	地震モーメント M_{0a} [N·m]	1.18×10^{19}	1.21×10^{19}	2.36×10^{19} N·m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.4 MPa	16.3 MPa	31.9 MPa	22.5 MPa
	短周期レベル A_a [N·m/s ²]	1.54×10^{19}	—	—	
	平均すべり量 D_a	236 cm		461.2 cm	365.8 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	551.1 km ²	547.6 km ²	690.3 km ²	
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	1.56×10^{19}	1.54×10^{19}	3.00×10^{19} N·m	
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.9 MPa	3.3 MPa	6.4 MPa	4.5 MPa
	短周期レベル A_b [N·m/s ²]	5.88×10^{18}	—	—	
	平均すべり量 D_b	86 cm	85 cm	165.5 cm	131.3 cm

*1: 四国電力は入倉・三宅の手法で敷地前面海域断層群 54km の断層パラメータを求める際 [37], A 法では $S_a/S = 0.267$ とやや大きくなるため, アスペリティ面積比を固定する方法を用いているが, 通常のレシピでは $S_a/S = 0.22$ とすべきところ, $S_a/S = 0.215$ としている. また, 長大な断層に対して推奨されている Fujii-Matsu'ura による応力降下量 ($\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 3.1/0.215 = 14.4\text{MPa}$) を採用している. 通常であれば, 短周期レベル A を地震モーメント M_0 から算出するが, 応力降下量からアスペリティと背景領域の短周期レベルを $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ から求め, 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より求めている. 通常のレシピによる $S_a/S = 0.22$ 法によるパラメータは「F-M 不採用」の欄に示した値になるが, 「F-M 採用 (四電)」の欄の値と比較すると, 短周期レベルはそれほど変わらないものの, 応力降下量が過小設定になっていることがわかる. 「F-M 不採用」の欄でアスペリティ全体と背景領域の短周期レベルの値を「—」としているのは, 通常のレシピでは地震モーメントに対応する短周期レベルのすべてをアスペリティに割り当て, 背景領域の短周期レベルを無視しているからである. また, 四国電力の計算した気象庁マグニチュードが「(M7.3 : 四電)」と小さくなっているのは, 地震モーメント M_0 [N·m] を気象庁マグニチュード M へ換算する式として, 四国電力は通常の $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ ではなく, それを簡略化した式 $M = (1/1.2)(\log_{10} M_0 - 10.7)$ を用いているためである. 以前は, このように気象庁マグニチュードを小さく計算し, これを耐専スペクトルなど距離減衰式に用いて地震動を過小評価していたが, さすがに今では, このような方法を用いてはならず, 過去の遺物を引きずっているといえる.

*2: 修正レシピでは, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ より, 地震モーメント M_0 を求める. 短周期レベルから応力降下量を求める A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 背景領域の地震モーメントがマイナスになり無意味になるため, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma = 0.22$ 法で求める. 入倉式から断層面積を逆算すると 981.4km² となるが, 修正レシピでは断層長さと同幅の拡張上限をそれぞれ 5km と 2km にしており, この上限値まで拡張しても 885.0km² にとどまるため, 上限まで拡張した. 新レシピでは, 断層面積が 1800km² を超えない限り, Fujii-Matsu'ura の応力降下量が使えないため, 応力降下量は通常のレシピ通りに算出した. 実際には断層モデルのメッシュの整数倍で断層の長さと同幅が決められるため, 応力降下量は断層面積を拡張した場合としない場合の中間の値になる.

四国電力は, 2013 年 7 月申請時には 69km モデルを断層モデルで評価していたが, 基本震源モデル変更の際にして, 69 km モデルは 130km モデルに含まれると見なし断層モデルでは評価していない. 参考のため, 69km モデルについて修正レシピ (上限まで拡大) で求めたパラメータは次の通りである (比較のため括弧内に申請時の 69km モデルのパラメータ値を示す): $L = 74\text{km}$ (69km), $W = 15\text{km}$ (13km), $S = 1110.0\text{km}^2$ (897.0km²), $M_0 = 9.18 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ ($4.48 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$), $A = 2.39 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ($1.83 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$), $D = 206.8\text{cm}$ (125cm), $\Delta\sigma = 6.0\text{MPa}$ (3.1MPa), $\Delta\sigma_a = 27.5\text{MPa}$ (14.0MPa : $S_a/S = 0.22$ なら 14.1MPa, $S_a/S = 0.215$ なら 14.4MPa とすべきところだが, 原典のまま引用), $S_a = 244.2\text{km}^2$ (0.22) (197.3km²(0.22)), $D_a = 413.7\text{cm}$ (250cm), $\sigma_b = 5.5\text{MPa}$ (2.8MPa), $D_b = 148.5\text{cm}$ (90cm)

表 7: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の震源パラメータ *1[37]

	地震モーメント M_o [Nm] (比)	短周期レベル A [Nm/s ²]	応力降下量 ($\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, 1.5\Delta\sigma_a$ or 20MPa)	S_a/S ($=\Delta\sigma/\Delta\sigma_a$)
壇ら (2011) の手法に基づく (四国電力) *2				
480km モデル	6.08×10^{19} (2.22)	1.56×10^{19}	(3.4MPa, 12.2MPa, 20MPa)	0.279
130km モデル	6.20×10^{19} (2.26)			
54km モデル	5.84×10^{19} (2.13)			
断層幅 12km で壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル (引用者が算出) *2				
480km モデル	7.69×10^{19} (2.81)	2.49×10^{19}	(4.3MPa, 19.5MPa, 29.3MPa)	0.22
130km モデル	7.85×10^{19} (2.86)			
54km モデル	7.38×10^{19} (2.69)			
Fujii-Matsu'ura(2000) の手法に基づく (四国電力: ただし, 54km モデルは引用者が算出) *3				
480km モデル	1.35×10^{20} (4.93)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
130km モデル	9.92×10^{19} (3.62)			
54km モデル	6.69×10^{19} (2.44)			
入倉・三宅 (2001)+Fujii-Matsu'ura の手法に基づく (四国電力) *4				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
入倉・三宅 (2001)+断層モデルのレシピから引用者が算出 (上段: A 法, 下段: $S_a/S = 0.22$ 法) *5				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 13.4MPa, 20.1MPa)	0.267
	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 16.3MPa, 24.5MPa)	0.22
松田式で地震規模を求め断層面積を広げる修正レシピから引用者が算出 ($S_a/S = 0.22$ 法) *6				
54km モデル	5.36×10^{19} (1.96)	2.00×10^{19}	(5.0MPa, 22.5MPa, 33.7MPa)	0.22

*1: 敷地前面海域断層群 54km 基本ケースの震源断層は, 傾斜角 90 度 (鉛直) の右横ずれ断層で, 上端深さ 2km, 断層長さ $L = 54.0$ km, 断層幅 $W = 13.0$ km, 断層面積 $S = 702.0$ km², 剛性率 $\mu = 3.31 \times 10^{10}$ N/m², S 波速度 $\beta = 3.5$ km/s, 密度 $\rho = 2.7$ g/cm³, 破壊伝播速度 $V_r = 2.5$ km/s である. 480km と 130km のモデルにおいては, カスケード方式 (断層面積に比例して地震モーメントを配分) で, 全体の一部をなすものとして 54km 断層群の震源パラメータが算出されている.

*2: 壇ら (2011)[9] は, Irie et al.(2010)[?] の動学的断層破壊シミュレーション結果から導かれた関係式 $\Delta\sigma = M_o(0.5 + 2 \exp(-L/W_{\max})) / (SW_{\max})$ を国内 9 地震, 海外 13 地震のデータに当てはめて平均動的応力降下量を求め, その幾何平均として $\Delta\sigma = 3.4$ MPa を導いている. その際, 断層面積 S と断層長さ L は各地震データの値を用いているが, 断層幅は $W = S/L$ ではなく, すべて $W_{\max} = 15$ km としている. つまり, $\Delta\sigma = 3.4$ MPa と $W_{\max} = 15$ km はベアになっている. 壇らの回帰式を用いて地震モーメント M_o の平均像を求めるのであれば, $W_{\max} = 15$ km とすべきところ, 四国電力は全体の断層帯の平均断層幅 (480km モデルで 12.7km, 130km モデルと 54km モデルで 13.0km) を用いている. その結果, 壇らの回帰線からずれる結果になっている. こうして得た全体の地震モーメントを断層面積に比例して配分している. たとえば, 480km モデルでは, 全体の断層面積が 6124.2km², 地震モーメントが 5.30×10^{20} Nm になるため, 54km モデルの地震モーメントは $M_o = 5.30 \times 10^{20} \times (702.0/6124.2) = 6.08 \times 10^{19}$ Nm となっている. 壇らの用いた国内 9 地震の平均断層幅は 12.0km なので, $W_{\max} = 12.0$ km として, 壇らの回帰線に合うように調整すると $\Delta\sigma = 4.3$ MPa になり, 「壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル」のように, 地震モーメントは壇らの回帰線上に載り, 短周期レベルや応力降下量も大きくなる (アスペリティ面積比は 0.279 では大きすぎるため, 断層モデルのレシピに従い $S_a/S = 0.22$ とした).

*3: Fujii-Matsu'ura(2000) は, 2次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニックローディングによる有限長断層運動シミュレーションから経験式 $M_o = WL^2\Delta\sigma/(aL + b)$ を導き, これを国内外の地震データに回帰させて, 断層平均応力降下量を $\Delta\sigma = 3.1$ MPa と求めている. ただし, リソスフェアの厚さ = 30km, 剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}$ N/m², $a = 1.4 \times 10^{-2}$, $b = 1.0$, $W = 15$ km としている. ここでも, 断層幅は 15km であり, 12~13km の震源断層に適用する際にはこの違いを考慮する必要がある. しかし, 四国電力にも原子力規制委員会にも, この違いを考慮した形跡は見られない. こうして得た全体の断層帯に対する地震モーメントを断層面積に応じて 54km モデルに比例配分している.

*4: 四国電力は入倉・三宅の手法を用いる際, 短周期レベルや応力降下量を通常のレシピに従って求めるのではなく, レシピでは 100km 以上の「長大な断層」に適用すべきとされている Fujii-Matsu'ura の手法を用いている.

*5: 通常の断層モデルのレシピに従い, 入倉・三宅の手法で地震規模を求め, 短周期レベルや応力降下量についても通常のレシピに従って求めた. 上段の「A 法」とは短周期レベルからアスペリティ総面積を求める方法で, 下段の「 $S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する方法である. A 法では, 断層面積が大きくなるほどアスペリティ面積の全断層面積との比 S_a/S が大きくなり, 応力降下量が小さくなる. そのため, 地震調査研究推進本部のレシピでは, 長大な断層に関しては $S_a/S = 0.22$ 法を用いるように推奨し, 「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」としている. 壇らの $S_a/S = 0.279$ は平均像からかなり離れ, 27% の上限も超えている.

*6: 松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で断層長さ L [km] から気象庁マグニチュードを求め, 換算式 $\log_{10} M_o$ [Nm] = $1.17M + 10.72$ で地震モーメントを求め, 修正レシピに従い, 断層長さを $L = 54.0 + 5.0 = 59.0$ km, 断層幅を $W = 13.0 + 2.0 = 15.0$ km, したがって, 断層面積を $S = 885.0$ km² として通常の断層モデルのレシピを用いた. この場合, A 法では $S_a/S = 0.411$ と過大になるため, $S_a/S = 0.22$ 法の結果だけを示した. この場合の地震モーメントは壇らの 54km モデルや Fujii-Matsu'ura の 54km モデルにおける地震モーメントの値にほぼ等しい. こうなるのは, この規模の断層長さに対応する地震データには, 壇らも Fujii-Matsu'ura も国内地震データを用いて回帰式を導いているからであり, 入倉・三宅の手法による地震モーメントがこれらの半分程度に小さくなっているのは, 彼らの回帰式が北米中心の地震データに基づいているからである.

倍に増えるため、この効果も付け加わる。

仮に、54kmの断層モデルによる地震動評価が約1.6倍強となった場合には¹⁰、表5のSs-7は700ガル以上になり、水平方向・鉛直方向ともに、0.1秒付近や0.2~0.3秒付近の重要な周期帯でSs-1をかなり超えることになる。

四国電力は、2013年7月申請時には54kmの不確かさとして69kmを断層モデルで評価していたが、基本震源モデル変更之际、これは130kmに包含されると見なし評価していない。しかし、130kmは壇ら(2011)のモデルで解析されており、これに包含されるというのは当たらない。69kmモデルについて、54kmと同様に修正レシピ(上限まで拡大)で断層パラメータを求めると、表6の注釈に記したとおり、申請時のパラメータ値と比べて、地震モーメントで約2.0倍、断層面積で約1.2倍、短周期レベルで約1.3倍、応力降下量で約2.0倍、アスペリティ面積で約1.2倍になる。つまり、69kmモデルでは2倍以上の地震動評価結果になる。基準地震動Ss-1は69km北傾斜ケースの耐専スペクトルに規定されており、69km鉛直ケースの耐専スペクトルは適用外とされているが、69kmの修正レシピによる断層モデルで地震動評価をすれば、これと同等の地震動評価結果が得られると推定される。そうなれば、伊方3号の855ガルのクリフエッジを超え、再稼働できなくなるであろう。

伊方3号の場合には、これに加えて、表7に示すとおり、480km、130km、54kmモデルに適用されている壇ら(2011)の断層モデルのパラメータも過小設定されており、これらの地震動評価結果もアスペリティ応力降下量の比から約1.6倍(=19.5MPa/12.2MPa)に引上げられねばならない。そうなれば、69kmモデルの修正レシピによる断層モデルによる地震動評価見直しと同様に、伊方3号の855ガルのクリフエッジを超える可能性がある。その詳細は別項[33]に譲る。

¹⁰伊方3号では、統計的グリーン関数法と経験的グリーン関数法の両方で断層モデルによる地震動評価を行っている。前者では要素地震の応力降下量や短周期レベルを直接増減して要素地震波を作成するが、後者の経験的グリーン関数法では、要素地震と検討用地震の応力降下量の比の値を増減し、短周期レベルの増減もすべり速度関数の調整で考慮する。したがって、いずれにおいても応力降下量が1.6倍になれば、地震動評価結果を1.6倍に引上げる効果があり、これに短周期レベルの増減やアスペリティ面積増大の効果加わることになる。

6 島根2号の基準地震動への影響

島根2号の基準地震動は2016年6月段階で表8のようになっているが、断層モデルによる地震動評価がまだ検討段階にある。800ガルの基準地震動Ss-DHを規定しているのは「F-III~F-IV~F-V断層(傾斜角60度)」の耐専スペクトル(内陸補正なし)だが、「宍道断層」の全ケースおよび「F-III~F-IV~F-V断層」のアスペリティ横長・縦長両ケースについては耐専スペクトルを「適用外」としており、「700ガルを超える場合はすべて適用外」にしたと考えられる。このようにしても、断層モデルによる地震動評価結果は小さすぎて、どの周期帯においてもSs-Dを超えないため、断層モデルによって作成される基準地震動は全く存在しない。

「震源を特定して策定する地震動」の基本震源モデルは「宍道断層」と「F-III~F-IV~F-V断層」だが、「宍道断層」とは異なり、「F-III~F-IV~F-V断層」については、その基本ケースが3月の「80度傾斜ケース」[4]から6月には「鉛直ケース」[6]に変更された。この段階での断層モデルによる地震動評価結果を全ケース重ね描きしたのが図6である。断層モデルによる地震動評価結果は、水平方向、鉛直方向ともに基準地震動Ss-Dにかなり接近しているが、どの周期帯においてもそれを超えることはない。耐専スペクトルの多くのケースが適用外にされていることを考慮すれば、このこと自身が断層モデルによる地震動評価が過小評価であることを示している。

中国電力は「宍道断層」と「F-III~F-IV~F-V断層」のいずれの基本ケースでも、入倉式による断層モデルで短周期レベルAからアスペリティ面積と応力降下量を求める手法(A法)を用いており、Fujii-Matsu'uraの応力降下量は採用していない。ただし、「F-III~F-IV~F-V断層」(80度傾斜)には、Fujii-Matsu'uraの応力降下量を採用している。

では、島根2号では、島崎氏の問題提起と新レシピの適用で、地震動評価結果はどのようになるのであろうか。

宍道断層では、表9より、「修正・新レシピ」では、地震モーメントは約2.4倍、短周期レベルは約1.3倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 2.44\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」から断層面積を変えない場合は

表 8: 島根 2 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [4, 6]

基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動 (耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-D	設計用模擬地震波 (F-III~F-IV~F-V 断層による地震)	800		534
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-N1	2004 年北海道留萌支庁南部地震 M6.1 の解放基盤波	620		320
Ss-N2	2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム (監査廊) の観測記録	528	531	485

約 1.9 倍の「 $\Delta\sigma = 5.79\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 26.3\text{MPa}$ 」へとかなり大きくなるが、修正レシピで断層面積を変えた場合には約 1.15 倍の「 $\Delta\sigma = 3.56\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 16.2\text{MPa}$ 」への微増にとどまる。断層面積を変えない場合と比べて、応力降下量の増加度が余りに小さい。これは、断層長さが 25km、断層幅が 13km と小さい場合に、長さで 5km、幅で 2km も拡大すれば、断層面積が元の約 1.4 倍にもなり、応力降下量が過小に算定されてしまうためである。この点は、大飯・高浜原発の「FO-A~FO-B~熊川断層」の場合、修正・新レシピでは地震モーメントが約 1.4 倍になる一方、断層面積は約 1.2 倍にとどまったのと対照的である。したがって、断層幅が 13km と短く、断層長さが 20~35km の場合には、修正レシピによる震源断層拡大を単純に適用すると応力降下量を過小算定することになりかねない。

この点では、注 3 に示したとおり、宍道断層が断層長さ 22km (M7.1) と評価されていた 2010 年当時、旧原子力安全委員会で、断層幅だけを 2km 増やした解析を行っており、ここでも、断層幅だけを 2km 拡大したケースを評価した。その結果、表 9 の「修正・新レシピ」の「断層幅のみ拡大」の欄に記載の通り、応力降下量は「 $\Delta\sigma = 4.67\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 21.2\text{MPa}$ 」へ約 1.5 倍になる。この場合には、地震動評価結果は図 6 の 1.5 倍強になり¹¹、0.02~0.3 秒の重要な周期帯で、宍道断層について適用外とされた 1,000 ガル以上の耐専スペクトルに相当する地震動になり、島根 2 号の 1,014 ガルのクリフエッジを超えるであろう。

断層長さ 48km の「F-III~F-IV~F-V 断層」(基本)では、地震モーメントは約 1.9 倍、短周期

¹¹ 島根 2 号では統計的グリーン関数法による断層モデルを用いており、要素地震波形に応力降下量や短周期レベルの増大が直接反映されるが、これにアスペリティ面積の増大効果が追加される。

レベルは約 1.2 倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 3.39\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 12.7\text{MPa}$ 」から約 2.3 倍の「 $\Delta\sigma = 6.40\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 29.1\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約 1.6 倍の「 $\Delta\sigma = 4.45\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 20.2\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)と大きくなる。地震動評価結果が修正レシピで約 1.6 倍強になれば、図 6 の青線の「F-III~F-IV~F-V 断層」が約 1.6 倍強に引き上げられ、基準地震動 Ss-D にかなり近づく。この Ss-D は「F-III~F-IV~F-V 断層 (傾斜角 60 度)」の耐専スペクトルで規定されており、これとの整合性が出てくるということを意味する。このように、断層モデルによる地震動評価結果は、どの原発においても、耐専スペクトルの 1/3~1/2 程度にとどまっていたが、その主な原因は、島崎氏の問題提起にあった入倉式による地震規模の過小評価、および新レシピで採用できなくなった「概ね 80km を超える長大な断層」とは言えない断層への Fujii-Matsu'ura の応力降下量の採用であった。両者による過小評価が是正されれば、当然のごとく、両者の地震動評価結果にあった大きな食い違いは消えさる¹²。

大飯原発や伊方原発では、近距離の活断層による耐専スペクトルが適用外にされたため、断層モデルによる地震動評価結果が基準地震動を規定しているが、今回の断層モデルによる地震動評価の是正により、基準地震動が大きく引き上げられることは必至である。それは、適用外にされた耐専スペクトルと同程度の地震動が断層モデルで評価された結果に過ぎず、本来、耐専スペクトルが適用外にされていなければ、それが大きな基準地震

¹² 原発から遠くへ伸びる断層の場合には、耐専スペクトルは過小評価になる。たとえば、伊方 3 号では、54km より 69km のほうが大きい、130km、480km と伸びるほど小さくなる。また、耐専スペクトルでは極近距離内、特に震源域内の地震観測記録が反映されておらず、原子力安全基盤機構 JNES の解析結果では、耐専スペクトルは震源近傍で過小評価になっている。これら以外では両者で大差はないはずである。

表 9: 原子力規制庁による 2016 年 3 月ヒアリング段階の「宍道断層 (基本)」の断層パラメータ [5]

断層パラメータ		断層モデル (入倉)			
		修正レシピ ($S_a/S = 0.22$ 法) (注 1)			
		A 法 (中国電力)	断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大
傾斜角 θ		90°			
ずれの種類		横ずれ断層			
断層長さ L		25.0 km			30.0 km
断層幅 W		13.0 km		15.0 km	
断層面積 $S = LW$		325.0 km ²		375.0 km ²	450.0 km ²
断層上・下端深さ		2 km · 15 km		2 km · $W_{\text{model}} = 17$ km	
破壊開始点		最大アスペリティ下端 2 種類 + 断層下端 3 種類			
破壊伝播方式		同心円状 (放射状)			
地震モーメント M_0		5.88 × 10 ¹⁸ N·m	1.39 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード		M6.9, M_w 6.4	M7.2, M_w 6.7		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		52.1 cm	123.5 cm	107.1 cm	89.2 cm
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.47 × 10 ¹⁰ N/m ²			
S 波速度 V_s (または β)		3.57 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.57 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$		2.44 MPa	5.79 MPa	4.67 MPa	3.56 MPa
短周期レベル A		9.56 × 10 ¹⁸ N·m/s ²	1.28 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
アスペリティ全体	等価半径 $r = \sqrt{S_a/\pi}$	4.23 km	4.77 km	5.12 km	5.61 km
	面積 $S_a = \pi r^2$	56.3 km ²	71.5 km ²	82.5 km ²	99.0 km ²
	地震モーメント $M_{0a} = \mu D_a S_a$	2.03 × 10 ¹⁸ N·m	6.13 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_a = (S/S_a)\Delta\sigma$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_a = 2D$	104.3 cm	247.1 cm	214.1 cm	178.4 cm
第一アスペリティ	面積 $S_{a1} = (16/22)S_a$	40.9 km ²	52.0 km ²	60.0 km ²	72.0 km ²
	地震モーメント M_{0a1} (注 2)	1.65 × 10 ¹⁸ N·m	4.99 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1} = \Delta\sigma_a$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_{a1} = M_{0a1}/(\mu S_{a1})$	116.6 cm	276.3 cm	239.4 cm	199.5 cm
第二アスペリティ	面積 $S_{a2} = (6/22)S_a$	15.3 km ²	19.5 km ²	22.5 km ²	27.0 km ²
	地震モーメント M_{0a2} (注 2)	3.80 × 10 ¹⁷ N·m	1.14 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2} = \Delta\sigma_a$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_{a2} = M_{0a2}/(\mu S_{a2})$	71.4 cm	169.2 cm	146.6 cm	122.2 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	268.7 km ²	253.5 km ²	292.5 km ²	351.0 km ²
	地震モーメント $M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	3.84 × 10 ¹⁸ N·m	7.80 × 10 ¹⁸ N·m		
	実効応力 σ_b (注 3)	2.45 MPa	4.69 MPa	3.52 MPa	2.93 MPa
	平均すべり量 $D_b = M_{0b}/(\mu S_b)$	41.2 cm	88.7 cm	76.9 cm	64.1 cm

注 1: 断層モデルによるレシピには、入倉式で断層面積から地震モーメント M_0 を求める方法と松田式で断層長さから気象庁マグニチュードを求め、それを地震モーメントに換算して用い、断層面積を拡張する方法 (修正レシピ) の 2 種類がある。修正レシピでは、入倉式で逆算した断層面積を上限として、断層長さを最大 5km、断層幅を最大 2km まで拡張できるが、上表では最大まで拡張した「断層面積拡大」、全く拡張しない「断層面積変えず」、旧原子力安全委員会の 2010 年 WG の解析 [2] に従って「断層幅のみ拡大」したケースの 3 通りを示した。また、断層が未飽和の場合や飽和断層でも断層長さが比較的短い場合には短周期レベルからアスペリティ総面積を求める「A 法」を用い、「A 法」で求めたアスペリティ面積と断層面積の比 S_a/S が大きくなりすぎる場合には、アスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用いる。「断層モデル (入倉式)」の「A 法」では $S_a/S = 0.173$ と小さいため、「 $S_a/S = 0.22$ 法」は参考として示したが、「修正レシピ」では、左から順に $S_a/S = 0.547, 0.411$ および 0.286 と過大になったため、「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用いている。

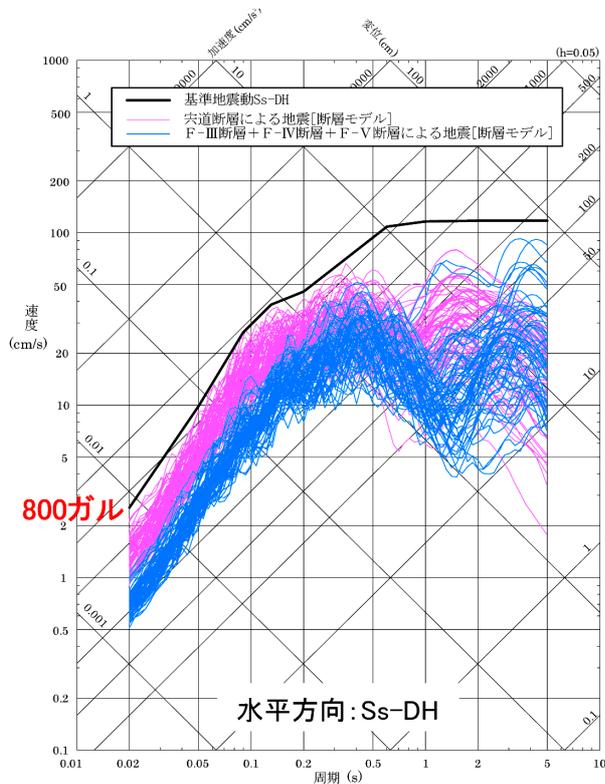
注 2: 中国電力は $M_{0ai} = M_{0a} S_{ai}^{3/2} / (S_{a1}^{3/2} + S_{a2}^{3/2})$ とし、アスペリティの地震モーメント M_{0a} をアスペリティ面積の 3/2 乗の値の比率で各アスペリティへ比例配分している。これは $D_{ai} = \gamma_i D_a / \sum_{i=1}^{N_a} \gamma_i^3$, $M_{0ai} = \mu D_{ai} S_{ai}$ としても同じである。

注 3: 中国電力は $\sigma_b = \frac{D_b}{W_b} \frac{\sqrt{\pi r} \sum_{i=1}^{N_a} \gamma_i^3}{D_a} \Delta\sigma_a$, $\gamma_i = r_i/r = \sqrt{S_{ai}/S_a}$ としている。

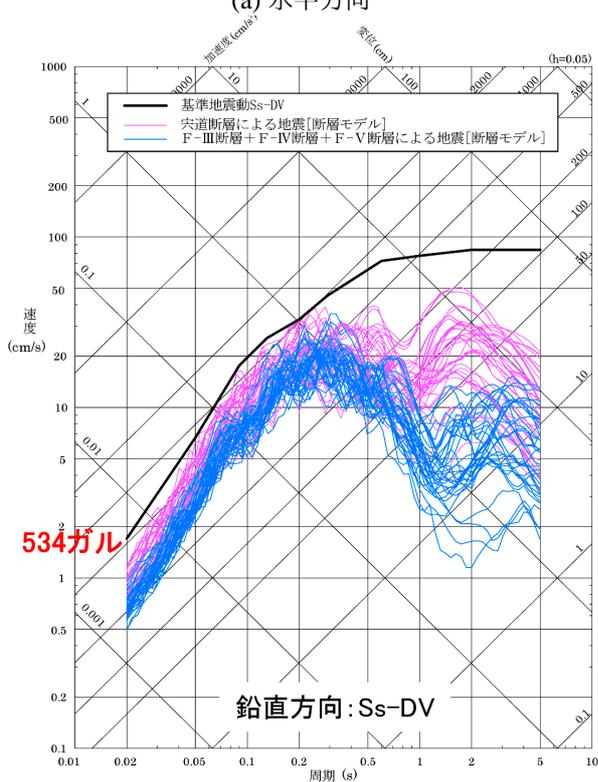
表 10: 原子力規制庁によるヒアリング段階の「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」の断層パラメータ [6]

断層パラメータ	断層モデル (入倉式) (注)		修正・新レシピ		
	A 法 (中国電力)	$S_a/S = 0.22$ 法	断層面積変えず	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90° (鉛直)				
断層長さ L	48.0 km		53.0 km		
断層幅 W	13.0 km		15.0 km		
断層面積 $S = LW$	624.0 km ²		795.0 km ²		
断層上・下端深さ	2 km · 15.0 km		2 km · 17.0 km		
地震モーメント M_0	2.17 × 10 ¹⁹ N·m		4.09 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード	M7.4, M _w 6.8		M7.6, M _w 7.0		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	100.1 cm		186.0 cm	148.4 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.47 × 10 ¹⁰ N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.57 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.57 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{3/2}$	3.39 MPa		6.40 MPa	4.45 MPa	
短周期レベル A	1.48 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		1.83 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
西側セグメント	断層長さ L_1	18.0 km		19.9 km	
	断層面積 S_1	234.0 km ²		298.1 km ²	
	地震モーメント M_{01}	6.87 × 10 ¹⁸ N·m		1.30 × 10 ¹⁹ N·m	
	平均すべり量 D_1	84.7 cm		159.9 cm	
	アスペリティ S_{1a}	62.6 km ²		51.5 km ²	65.6 km ²
		M_{01a}	3.68 × 10 ¹⁸ N·m	3.02 × 10 ¹⁸	5.71 × 10 ¹⁸ N·m
	$\Delta\sigma_{1a}$	12.7 MPa	15.4 MPa	29.1 MPa	20.2 MPa
	D_{1a}	169.4 cm		319.8 cm	251.1 cm
	背景領域 S_{1b}	171.4 km ²		182.52 km ²	232.54 km ²
		M_{01b}	3.20 × 10 ¹⁸ N·m	3.85 × 10 ¹⁸	7.27 × 10 ¹⁸ N·m
	σ_{1b}	2.47 MPa	3.02 MPa	5.70 MPa	3.44 MPa
	D_{1b}	53.8 cm	60.8 cm	114.8 cm	90.1 cm
	東側セグメント	断層長さ L_2	30.0 km		33.1 km
		断層面積 S_2	390.0 km ²		496.9 km ²
地震モーメント M_{02}		1.48 × 10 ¹⁹ N·m		2.79 × 10 ¹⁹ N·m	
平均すべり量 D_2		109.4 cm		206.5 cm	
アスペリティ S_{2a}		104.3 km ²		85.8 km ²	109.3 km ²
		M_{02a}	7.91 × 10 ¹⁸ N·m	6.51 × 10 ¹⁸	1.23 × 10 ¹⁹ N·m
$\Delta\sigma_{2a}$		12.7 MPa	15.4 MPa	29.1 MPa	20.2 MPa
D_{2a}		218.7 cm		412.9 cm	324.1 cm
背景領域 S_{2b}		285.7 km ²		304.2 km ²	387.56 km ²
		M_{02b}	6.88 × 10 ¹⁸ N·m	8.28 × 10 ¹⁸	1.56 × 10 ¹⁹ N·m
σ_{2b}		2.41 MPa	3.00 MPa	5.67 MPa	3.86 MPa
D_{2b}		69.4 cm	78.4 cm	148.2 cm	116.3 cm

注: 「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」が 2016 年 6 月に 3 月の「80 度傾斜」から「90 度鉛直」に変わった。断層長さも断層面積もそれほど変わらないにもかかわらず、「80 度傾斜」ではアスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用い、「90 度鉛直」では短周期レベル A からアスペリティ総面積を求める A 法を用いているが、その理由は不明である。断層モデルのレシピでは、 A 法でアスペリティ面積比 S_a/S が 0.27 を超えて過大な値になると $S_a/S = 0.22$ 法を用いるが、「F-III~F-IV~F-V 断層」では、「90 度鉛直」では $S_a/S = 0.267$ 、「80 度傾斜」では $S_a/S = 0.270$ と、レシピでの参照範囲 0.15~0.27 の中にギリギリ収まっており、過大気味だが、手法を変えなければならないほどではない。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図6: 島根2号の2016年3月現在の応答スペクトルによる基準地震動 Ss-D と断層モデルによる地震動評価結果の前ケース重ね描き [6]

動につながっていたであろうことを示しているにすぎないのである。

高浜原発では、耐専スペクトルが適用され、基

準地震動がそれによって規定されているため、今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることはない。しかし、そのことによって残された課題が注目を浴びることにならざるを得ない。それは高浜原発の項で述べた3つの内容だが、(i)耐専スペクトルと断層モデルは地震動評価の平均像を表すにすぎないが、これには最近20年間の国内地震観測記録が反映されていないこと、(ii)平均像からの標準偏差ひとつ分のバラツキ=「平均+標準偏差」が平均の2倍になるほどの偶然的不確かさの考慮がなされていないこと、(iii)M6.5の原発直下の地震が1,340ガルの地震動をもたらすという原子力安全基盤機構の解析と熊本地震によるその裏付けが考慮されていないこと、の3つである。

島根原発では、「F-III~F-IV~F-V断層」の耐専スペクトルが適用され、基準地震動がそれによって規定されているため、「F-III~F-IV~F-V断層」に関しては今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることはない。しかし、「宍道断層」の耐専スペクトルはすべて適用外とされたため、この断層に関する地震動評価結果は基準地震動には全く現れないが、その断層モデルによる地震動評価結果は基準地震動に極めて近かった。そのため、今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることは避けられない。ただし、これは修正レシピの適用の仕方に依存するが、耐専スペクトルとの整合性を考慮すれば、宍道断層の耐専スペクトルと同程度の地震動評価結果になるのが妥当であり、ここで示したように「断層幅のみ拡大」する修正レシピを用いるべきであろう。

7 川内1・2号の基準地震動への影響

川内1・2号の基準地震動は島根2号のそれよりさらにシンプルであり、表11のように耐専スペクトルに基づく基準地震動 Ss-1 と2004年北海道留萌市庁南部地震 M6.1のK-NET港町における地震観測記録の解放基盤波(はぎとり波) Ss-2の2つだけである。断層モデルによる地震動評価結果は基準地震動に全く現れない。それどころか、Ss-1

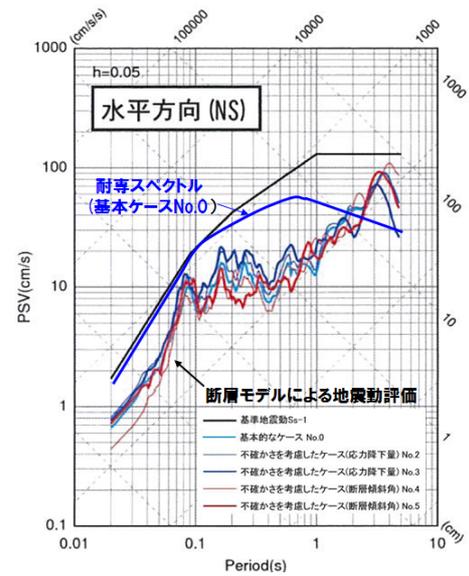
表 11: 川内 1・2 号の基準地震動 [gal][27]

基準地震動		水平成分	鉛直成分
震源を特定して策定する地震動			
Ss-1	設計用模擬地震波	540	324
震源を特定せず策定する地震動			
Ss-2	2004 年留萌支庁南部地震の解放基盤波	620	320

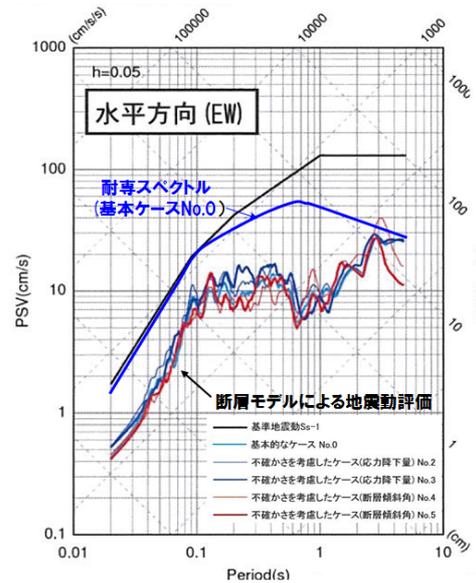
を規定しているのは図 7 に示される市来断層帯市来区間の耐専スペクトル（内陸補正なし）だが、この断層に対する断層モデルによる地震動評価結果は図 7 のとおり、耐専スペクトルの 1/2~1/3 にすぎない。あろうことか、九州電力は耐専スペクトルと断層モデルの間にあるこの大きな差を断層モデルによる地震動の過小評価とは捉えず、逆に、余裕を確保したものだと主張している。

九州電力は、表 12 の「九州電力」の欄に示すとおり、1997 年 5 月の鹿児島県北西部地震 M6.4 の応力降下量を「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ 」と算出し、これらをそのまま M7.2 の市来断層帯市来区間の応力降下量としている。この問題点については別項 [31, 48, 49] に譲り、ここでは島崎氏の問題提起が川内 1・2 号の基準地震動に与える影響を検討する。

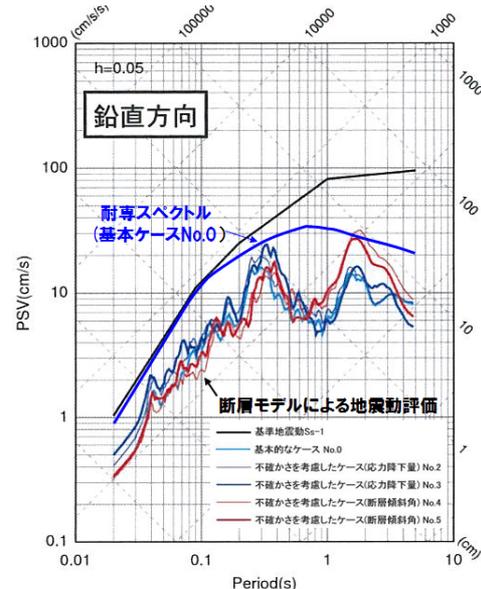
表 12 に示すとおり、市来断層帯市来区間の地震モーメントは「九州電力」と「修正・新レシピ」とで差はない。これは、九州電力が地震モーメントを断層面積から入倉式で求めるのではなく、応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ と断層面積 S から逆算したためであり、結果として、「九州電力」の断層面積 S 、地震モーメント M_0 、平均すべり量 D 、応力降下量 $\Delta\sigma$ の各値は「修正・新レシピ」の「断層面積変えず」の欄の各値と丸め誤差の範囲内ではほぼ一致する。ところが、短周期レベル A およびアスペリティの面積 S_a と応力降下量 $\Delta\sigma_a$ については、両者で大きく異なる。これは、九州電力が、1997 年 5 月の鹿児島県北西部地震からアスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と過小に算出し、アスペリティ面積比を $S_a/S = 0.365$ と異常に過大な値に算定し、ここから A を逆算しているからである [31]。断層モデルのレシピ通りにアスペリティ面積比を $S_a/S = 0.22$ とすれば、自動的に $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ が導かれる。この値は、1997 年



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図 7: 適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動 Ss-1 と市来断層帯市来区間 (24.9km, M7.2) の地震動評価結果 (2014.3.12)[27]

表 12: 川内 1.2 号における市来断層帯市来区間の断層パラメータ

断層パラメータ	九州電力 *1		修正・新レシピ *3			
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定		断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)					
断層長さ L	24.9 km			29.9 km		
断層幅 W	13 km		15.0 km			
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²		373.5 km ²	448.5 km ²		
断層上端深さ	2 km					
断層下端深さ	15 km			$W_{\text{model}}=17$ km		
破壊開始点	アスペリティ 東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類					
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)					
地震モーメント M_0	1.39 × 10 ¹⁹ N·m	1.39 × 10 ¹⁹ N·m				
マグニチュード	M7.2, M _W 6.7	M7.2, M _W 6.7				
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	130.0 cm	112.7 cm	93.8 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31 × 10 ¹⁰ N/m ²					
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s					
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s					
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	5.8 MPa	4.7 MPa	3.6 MPa		
短周期レベル A	1.53 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	1.28 × 10 ¹⁹ N·m/s ²				
アスペリティ 全体	面積 S_a	118.08 km ² (0.365)	71.21 (0.22)	82.17 (0.22)	98.67 (0.22)	
	地震モーメント M_{0a}	1.02 × 10 ¹⁹ N·m	6.16 × 10 ¹⁸ N·m			
	平均すべり量 D_a	260.3 cm	261.4 cm	226.5 cm	188.6 cm	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	26.5 MPa	21.4 MPa	16.2 MPa	
	短周期レベル A_a	1.50 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	-			
背景領域	地震モーメント M_{0b}	3.70 × 10 ¹⁸ N·m	7.77 × 10 ¹⁸ N·m			
	面積 $S_b = S - S_a$	205.62 km ²	252.49 km ²	291.33 km ²	349.83 km ²	
	平均すべり量 D_b	54.4cm	93.0 cm	80.6 cm	67.1 cm	
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	5.0 MPa	4.0 MPa	3.1 MPa	
	短周期レベル A_b	3.14 × 10 ¹⁸ N·m/s ²	-			

*1:九州電力は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 (気象庁発表 M6.4) の特性化震源モデルのパラメータを根拠に $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と固定し, アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めている. そのため, アスペリティ面積は断層面積の 36.5% と異常に大きくなっている. これは鹿児島県北西部地震など M6 クラスの未飽和断層のデータを M7 クラスの飽和断層にそのまま適用した結果であり, 両者でスケール則が全く異なることを無視しており, 妥当とは言えない. 九州電力は, 通常の断層モデルのレシピが使えないため, 短周期レベルをアスペリティと背景領域に割り当て, それぞれ $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ とし, 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より算出している. 地震モーメントも $M_0 = (16/7)\Delta\sigma(S/\pi)^{3/2}$ より逆算しており, 入倉式による値より大きく, 偶然だが, 断層長さから松田式で求めた値 (上表の「修正・新レシピ」の欄の値) にほぼ一致する. このため, 松田式で求めたものではないかと錯覚させるが, 短周期レベルと応力降下量を比較すれば明らかのように, 中身は全く違う.

*2:修正レシピでは, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ より, 地震モーメント M_0 を求める. 短周期レベルから応力降下量を求める A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 背景領域の地震モーメントがマイナスになり無意味になるため, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma = 0.22$ 法で求める. 入倉式から断層面積を逆算すると 500.5km² となるが, 修正レシピでは断層長さとの拡張上限をそれぞれ 5km と 2km にしており, この上限値まで拡張しても 448.5km² にとどまるため, 上表では最大まで拡張した「断層面積拡大」, 全く拡張しない「断層面積変えず」, 旧原子力安全委員会の 2010 年 WG での解析 [2] に従って「断層幅のみ拡大」したケースの 3 通りを示した.

表 13: 川内 1-2 号における市来断層帯市来区間の断層パラメータ (応力降下量の不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	修正・新レシピ *2			
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	24.9 km			29.9 km	
断層幅 W	13 km	15.0 km			
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²	373.5 km ²	448.5 km ²		
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km			$W_{\text{model}}=17$ km	
破壊開始点	アスペリティ東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	1.39×10^{19} N·m	1.39×10^{19} N·m			
マグニチュード	M7.2, M_W 6.7	M7.2, M_W 6.7			
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	130.0 cm	112.7 cm	93.8 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa (8.7 MPa)	8.7 MPa	7.1 MPa	5.4 MPa	
短周期レベル A	1.92×10^{19} N·m/s ² (2.30×10^{19})	1.92×10^{19} N·m/s ²			
アスペリティ 全体	面積 S_a	118.08 km ² (0.365)	71.21 (0.22)	82.17 (0.22)	98.67 (0.22)
	地震モーメント M_{0a}	1.02×10^{19} N·m	6.16×10^{18} N·m		
	平均すべり量 D_a	260.3 cm	261.4 cm	226.5 cm	188.6 cm
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	19.875 MPa (23.85 MPa)	39.7 MPa	32.1 MPa	24.4 MPa
	短周期レベル A_a	1.88×10^{19} N·m/s ² (2.25×10^{19})	-		
背景領域	地震モーメント M_{0b}	3.70×10^{18} N·m	7.77×10^{18} N·m		
	面積 $S_b = S - S_a$	205.62 km ²	252.49 km ²	291.33 km ²	349.83 km ²
	平均すべり量 D_b	54.4cm	93.0 cm	80.6 cm	67.1 cm
	実効応力 σ_b	3.125 MPa (3.75 MPa)	7.5 MPa	6.1 MPa	4.6 MPa
	短周期レベル A_b	3.92×10^{18} N·m/s ² (4.70×10^{18})	-	-	

*1: 「応力降下量の不確かさ」を考慮するため、通常は、断層モデルで求めた短周期レベルと応力降下量 (または実効応力) がすべて 1.5 倍になるよう波形合成の際に工夫する。たとえば、上表で「修正・新レシピ」では、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、背景領域実効応力 σ_b および短周期レベル A, A_a, A_b の各値は表 12 の各値の 1.5 倍になっている。ところが、九州電力の欄では表 12 の各値の 1.25 倍にすぎない (1.5 倍の値を括弧内に示す)。その理由は、表 12 の九州電力の欄の短周期レベルを 1.5 倍すると 2.30×10^{19} N·m/s² になるが、表 12 の九州電力の欄の M_0 に対応する短周期レベルの値は断層モデルのレシピから 1.28×10^{19} N·m/s² (偶然だが、結果的に「修正・新レシピ」の欄の A の値にほぼ一致する) であり、それを 1.5 倍したものが 1.91×10^{19} N·m/s² なので、これと同程度であればよく、1.25 倍に留めるといふものである。これより、短周期レベルだけでなく応力降下量 (または実効応力) の値も 1.25 倍にすれば「1.5 倍」と同程度であるといふのである。ところが、表 12 の九州電力の M_0 と S から通常の断層モデルのレシピで応力降下量を求めると表 12 の「修正・新レシピ」の欄のようになり、これを 1.5 倍にした値は上表の「修正・新レシピ」の欄の値になる。九州電力の設定した応力降下量はこれらの値よりかなり小さく、20MPa にも達しない。

*2: 表 12 の「修正・新レシピ」の $A, \Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ の各値を 1.5 倍している。

5月の鹿児島県北西部地震のアスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = 25.1\text{MPa}$ にすべきとした主張 [31] に合致する。さらに、九州電力は短周期レベルと応力降下量を 1.5 倍にする不確かさの考慮において、地震モーメントに対応する短周期レベル A の値、すなわち、「修正・新レシピ」の A の値を 1.5 倍にした表 13 の A の値まで増やせば十分だとして、1.25 倍に留め、応力降下量についても理由なく 1.25 倍に留めている。この結果、「応力降下量の 1.5 倍ケース」でも 1.25 倍の 19.875MPa にしかならず、 20MPa を超えない¹³。

島崎氏の問題提起に基づき、松田式で地震モーメントを求める「修正・新レシピ」を採用すると、 $1.5\Delta\sigma_a$ の値は、 39.7MPa （「断層面積変えず」の場合）、 32.1MPa （「断層幅のみ拡大」した場合）および 24.4MPa （「断層面積拡大」の場合）となり、それぞれ、九州電力による 19.875MPa の 2.0 倍、1.6 倍および 1.2 倍になる。ちなみに、 $\Delta\sigma = 25.1\text{MPa}$ とした場合は、 37.6MPa 、1.9 倍になる。

仮に、地震動評価結果が約 1.6 倍（「断層幅のみ拡大」した場合）ないし約 1.9 倍（ $\Delta\sigma = 25.1\text{MPa}$ とした場合）になれば、図 7 の断層モデルによる地震動評価結果は耐専スペクトルにかなり接近し、一部で基準地震動を超えるであろう。この場合も、耐専スペクトルと断層モデルで大差のあった地震動評価結果が整合性のある形に収まり、九州電力の主張していた「断層モデルを基準にした余裕」は完全に消え失せる。そして、川内原発においても、高浜原発の項で指摘した 3 つの残された課題が浮上してくるのである。

8 結言

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏の問題提起は、原子力規制委員会を突き動かし、大飯原発の地震動評価の見直しにつながった。機を同じくして、地震調査研究推進本部は 6 月 10 日、断層モデルのレシピを改訂し、応力降下量の設定法を明確にした。両者が正当に考慮されれば、これまでに行われた断層モデルによる地震動評価結果は、例外なく、大きく引き上げられることは必至であ

り、基準地震動の見直しは避けられない。ここで明らかにした内容をまとめると、次のようになる。

大飯原発では、断層モデルによる地震動評価結果が、修正レシピで 1.5 倍強へ引き上げられ、1,260 ガルのクリフエッジをも超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

伊方原発では、54km モデルが修正レシピで 1.6 倍強、69km モデルでは 2.0 倍以上へ引き上げられ、855 ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

高浜原発では、修正レシピで 1.5 倍強へ引き上げられ、基準地震動 $Ss-1$ を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しが避けられない。

島根原発では、修正レシピをそのまま適用すると断層面積が過大になるため、旧原子力安全委員会と同様に断層幅の拡大に限定して適用すれば、25km の宍道断層の地震動評価結果は 1.5 倍強になり、1,014 ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

川内原発では、島根原発と同様に修正レシピを断層幅の拡大に限定して適用すれば、約 25km の市来断層帯市来区間の地震動評価結果は約 1.6 倍になり、一部の周期帯で基準地震動 $Ss-1$ を超えるため、基準地震動の見直しは避けられない。

どの原発においても、断層モデルによる地震動評価結果が 1.5 倍程度に引き上げられることになり、耐専スペクトルとの大きな差が消え去り、ほぼ同一になる。これが今回の見直しの核心である。その結果、次の残された課題がクローズアップされることになろう。

第 1 に、耐専スペクトルと断層モデルは地震動評価の平均像を表すにすぎないが、これには最近 20 年間の国内地震観測記録が反映されていないこと、

第 2 に、平均像からの標準偏差一つ分のバラツキ = 「平均 + 標準偏差」が平均の 2 倍になるほどの偶然的不確かさの考慮がなされていないこと、

第 3 に、 $M6.5$ の原発直下の地震が 1,340 ガルの地震動をもたらすという原子力安全基盤機構の解析と熊本地震によるその裏付けが考慮されていないこと、の 3 つである。

いずれにせよ、島崎氏の問題提起が無に帰されないよう地震動評価見直し作業を見守りたいと思う。

¹³ 旧原子力安全・保安院のときに $1.5\Delta\sigma_a$ と 20MPa の大きい方を採用することになったが [11]、これに違反している。

(注1) 原発基準地震動の「過小評価」指摘
～規制委、異例の検証へ～2年前に発端

(2016年6月19日福井新聞と中国新聞から転載)

関西電力大飯原発などの基準地震動(耐震設計の目安となる揺れ)が、計算式の不備が原因で過小評価されている可能性を原子力規制委員会の前委員長代理の島崎邦彦・東京大名誉教授(地震学)が指摘。慌てた規制委が島崎氏から説明を受け、検証を検討する異例の展開になった。

島崎氏の指摘が重要な新知見と確認されれば、規制委の審査基準改定や、一部原発の再審査も必要になる。だが、実は規制委は2年前にも同じ問題を指摘されていた。

▽二重基準 発端は2014年3月、国会内の会合で原子力規制庁のベテラン審査官を長沢啓行・大阪府立大名誉教授(工学)が追及したことだった。震源断層の面積から地震の規模(地震モーメント)を見積もる計算式は、北米の地震データに立脚し、日本の原発で適用すると過小評価につながる。

現在、基準地震動の計算では、断層面積を重視する入倉孝次郎・京都大名誉教授(強震動地震学)らによる「入倉・三宅」の計算式を、津波対策では断層長さを重視する武村雅之・名古屋大教授(地震学)による「武村」の計算式を使い、モーメントを求めている。

ところが、大飯原発直近の断層が起こす地震を想定すると、同じ断層なのに「武村」よりも「入倉・三宅」で計算した方が、モーメントが小さくなる。このため基準地震動を小さく見せることを目的とした「二重基準」との批判が他からも出ていた。

答えに窮した審査官は、島崎委員長代理らに相談して検討すると約束。その場を切り抜けた。

▽検証 審査官から相談を受けた当時、島崎氏は多忙で時間的余裕はなかった。「実際のデータに合うのは武村と入倉・三宅の間あたりだろうと思い、真面目に相手をしませんでした」と振り返る。規制庁に検討を指示したものの、報告はなかった。

島崎氏は14年9月の退任後、一人で本格的な検証作業を始めた。過去のデータを基に比較したところ、島崎氏自身が提唱した計算式や「武村」など、断層長さに注目した手法に比べ、「入倉・三宅」のモーメントが4分の1程度と小さいことに気付いたという。

島崎氏は、長沢氏の指摘を「ポイントを突いた議論だった」と話す。

▽本音 震源断層の面積は、地表に現れる「断層長さ」と、割れて揺れを生じる硬い岩盤の厚さ「断層幅」を掛けて計算する。垂直に近い断層では幅が短くなるため、長さが同じでも面積が小さくなり、過小評価となる危険が高い。こうした断層は西日本に多く、島崎氏が担当した関電の大飯や高浜、九州電力の玄海(佐賀県)などの審査でも対象となった。

島崎氏は今月、大飯原発3、4号機の運転差し止め訴訟控訴審(名古屋高裁金沢支部)でも同趣旨の陳述書を提出。規制委が島崎氏の指摘を受け入れると、各地の訴訟にも影響が及ぶ。規制庁幹部は「中長期的課題だ」と、対応を先送りしたいとの本音をのぞかせる。

(注2) 断層モデルによる地震動過小評価について

(i) 断層モデルによる「地震規模」の過小評価

「断層モデルのレシピ」とは地震調査研究推進本部地震調査委員会(以下「推本」と略す)の作成した「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」[19, 23]のことをさす。断層モデルのレシピはいくつも提案されているが、「入倉レシピ」[13, 14]などと特に呼ばない場合には推本のレシピをいう。同地震調査委員会が、2002年に糸魚川-静岡構造線断層帯の断層モデル[18]を作成して以降、国内計14の活断層に対して種々の断層モデル設定法を検証し、2005年に最初の「全国を概観した地震動予測地図」報告書を作成し、その別冊に「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」[19]としてまとめたのが最初である。

この『「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。[19]この考え方にに基づき、推本は2005年以降、全国地震動予測地図・全国を概観した地震動予測地図をほぼ毎年作成し公表しているが、そのたびにレシピも改訂してきた。2016年6月10日改訂版[23]が2016年6月現在の最新のレシピである。

中でも、2008年4月11日の改訂[20]は断層モデルのパラメータ設定に本質的な修正を加え、2016年6月10日の改訂[23]は概ね80km以上の「長大な断層」に満たない断層に対する応力降下量の設定法に重大な制限を加えたものであり、極めて重要である。

推本による活断層長期評価では活断層の長さから松田式[28]を用いて将来起こりうる地震の規模を推定していたが、レシピの断層モデルでは断層面積から地震規模を推定しており、これが松田式による地震規模と比べて1/5~1/2に過小算定されるという問題点があった。しかし、松田式による地震規模をそのままレシピに適用すると、地震動評価結果が非常に大きくなるため、現実の震源断層とは別に仮想モデルとして断層幅や断層長さを長くし、断層面積を少し増やしてレシピを適用するという折衷的なモデル設定法を追加した。これが2008年4月11日に改訂されたレシピ[20]であり、以下ではこれを「修正レシピ」とよぶ。

また、2016年6月10日に改訂されたレシピ[23]では、「長大な断層」がスケーリング則によって明確に定義され、これまで推本の中では常識であった「長大な断層」の定義がレシピの中に明記されたことで、電力各社が長大な断層に至らない断層に対して採用してきたFujii-Matsu'uraの応力降下量は採用できなくなった。以下では、これを「新レシピ」とよび、「修正レシピ」と合わせて「新レシピ」を適用する場合を「修正・新レシピ」とよぶ。

これらに詳しく触れる前に、まず、断層モデルのレシピ[19]自身に含まれる問題点について述べる。

表9に「宍道断層(基本)」の震源断層に対する断層パラメータを示す。推本の活断層長期評価では、断層長

さ $L = 25.0\text{km}$ から松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ を使って地震規模が $M7.2$ (気象庁マグニチュード) と算定され、断層モデルのレシピからは、断層面積 $S = 325.0\text{km}^2$ から次式 (入倉式) の飽和断層に関する下段の式を使って地震モーメント $M_o = 5.88 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}$ ($M6.9$ 相当) が求められる。

$$S = \begin{cases} 2.23 \times 10^{-15} M_o^{2/3}, & M_o < M_{ot}; \\ 4.24 \times 10^{-11} M_o^{1/2}, & M_o \geq M_{ot}, \end{cases} \quad (1)$$

ただし、この式での M_o の単位は $\text{dyn}\cdot\text{cm}$, $1\text{N}\cdot\text{m} = 10^7 \text{dyn}\cdot\text{cm}$, である。 M_{ot} は、断層幅 W が断層長さ L に等しくなり、これ以上の地震規模では断層幅が変わらない飽和状態 $W = W_{\max}$ になる「飽和断層」に関する地震モーメントの値であり、レシピでは $M_{ot} \equiv 7.5 \times 10^{25} \text{dyn}\cdot\text{cm} = 7.5 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ とされている。

表9の「修正レシピ」の欄に示すとおり、松田式による $M7.2$ は地震モーメントで $M_o = 1.39 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ に相当し、断層モデルによる地震規模は地震モーメントの値で42%にすぎない。これでは震源断層から42%のエネルギーしか放出されないことになり、地震動は大きく過小評価されてしまうのである。

なぜこうなるのかというと、Somerville et al.(1993) [44] が指摘したように日本国内の地震データと北西アメリカのデータでは断層パラメータに大きな差があるからである。レシピの元になったデータは入倉ら (2001) [13] の図8に示されるデータである。入倉らの地震データは、(a) Somerville et al.[45] による15地震 (米カリフォルニア10地震, 米アイダホ1地震, カナダ2地震, イラン1地震, 日本1地震で、ほとんどが北米大陸の地震), (b) Miyakoshi(2001 私信) のデータセット, (c) Wells and Coppersmith(1994) による244地震 (半数近くは米の地震, 1割程度が日本の地震) の3種類からなる。データ数は多いが、 $M_{ot} \leq M_o$ となるデータの大半は (c) のデータであり、武村 [46] は、Wells and Coppersmith(1994) が別のデータセットに対して求めた $L - M_o$ 回帰式を図11の黒点線で示し、これを2つの実線と比較した結果、「Wells and Coppersmith(1994) が求めた断層パラメータ間の関係は日本列島の地殻内地震には適用できないようである」 [46] と断じている。

$S - M_o$ 関係を示す図8の一点鎖線は

$$\log_{10} S = \begin{cases} \frac{2}{3} \log_{10} M_o - 14.74, & M_o < M_{ot}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_o - 10.71, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (2)$$

または、

$$S = \begin{cases} 1.82 \times 10^{-15} M_o^{2/3}, & M_o < M_{ot}; \\ 1.95 \times 10^{-11} M_o^{1/2}, & M_{ot} \leq M_o. \end{cases} \quad (3)$$

と表される武村の式であり、図11に示される日本国内の地震データから導かれたものである。具体的には、佐藤編著による「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」 [35] で体系的に整理された地震データの33の内陸地殻内地震を使っている。図8の入倉式 (太い破

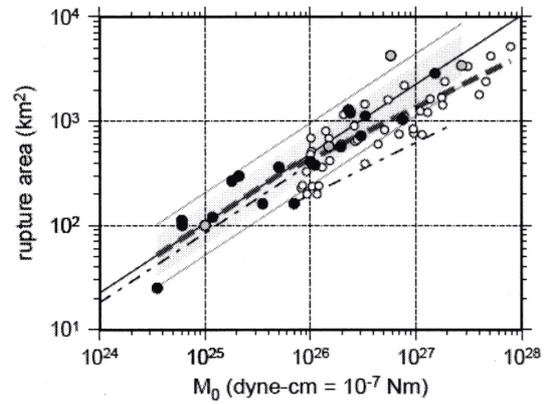


図8: 断層面積 S (rupture area) と地震モーメント M_o の関係 [13] (破線がレシピの式に相当, 入倉らは $L = 20\text{km}$ で $W_{\max} = 16.6\text{km}$ に達すると仮定し, 分岐点を $M_o = 7.5 \cdot 10^{25} \text{dyn}\cdot\text{cm}$ としている. 一点鎖線は武村 (1998) による $W_{\max} = 13\text{km}$ とした関係式で分岐点の M_o は同じ)

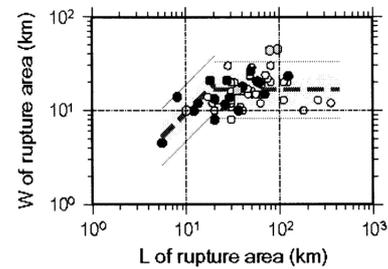


図9: 入倉ら [13] による $L - W$ の関係 (○は Well et al.(1994) ($M_{ot} < M_o$), ●は Somerville et al.(1999) および Miyakoshi(2001), 灰色の○は低角逆断層のデータ)

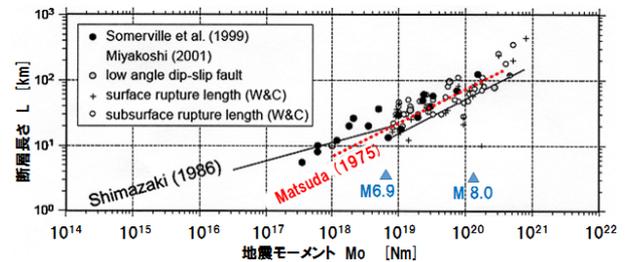


図10: 断層長さ L (rupture length) と地震モーメント M_o の関係 [13] (赤点線が松田式)

線) と武村式 (一点鎖線) を比べると武村式の方が下方にあり、同じ断層面積でも地震規模に大きな差があることが明らかである。

武村の $S - M_o$ 関係式は、最初に図11の国内地震データに対して $L - M_o$ 回帰式を

$$\log_{10} L = \begin{cases} \frac{1}{3} \log_{10} M_o - 7.28, & M_o < M_{ot}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_o - 11.82, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (4)$$

と導き、国内データでは断層幅が

$$W = \begin{cases} \frac{2}{3} L, & M_o < M_{ot}; \\ 13, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (5)$$

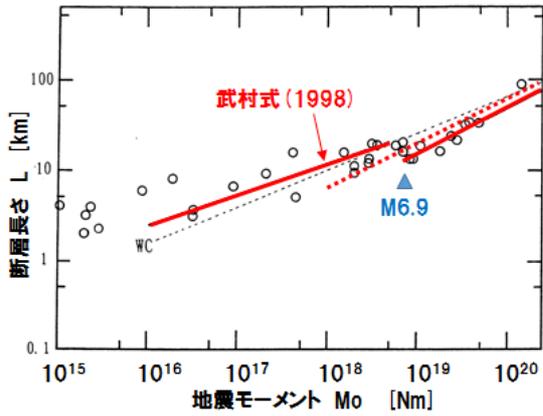


図 11: 武村 [46] による $L - M_0$ の関係 (赤点線で松田式を加筆)

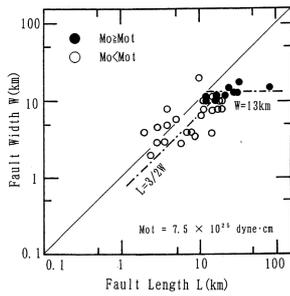


図 12: 武村 [46] による $L - W$ の関係

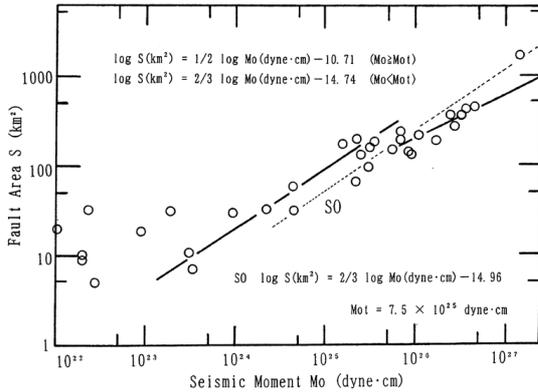


図 13: 武村 [46] による $S - M_0$ の関係

となることを利用している。つまり、断層長さが断層幅以上に長く、 $M_0 \geq M_{ot}$ (M6.8 程度以上) の地震をもたらす飽和断層における断層幅の平均値は国内データで 13km であり、入倉ら (2001) の北米中心の地震データの 16.6km より小さいのである。

武村の $L - M_0$ 関係式 (4) は、Shimazaki(1986)[39] が日本列島周辺の地殻内地震の断層長さ L と M_0 の関係を調べて

$$\log_{10} L = \begin{cases} 0.281 \log_{10} M_0 - 5.98, & M_0 < M_{ot}; \\ 0.524 \log_{10} M_0 - 12.44, & M_{ot} \leq M_0, \end{cases} \quad (6)$$

の関係式を導き、 $M_0 < M_{ot}$ では $M_0 \propto L^3$, $M_{ot} \leq M_0$ では $M_0 \propto L^2$ のスケーリング則が成り立つと結論づけたことによってしている。つまり、武村は、このスケー

リング則が図 11 の国内地震データに対しても成り立つと仮定して式 (4) を導いているのであり、両式で大差はない。

他方、松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ に $M - M_0$ 換算式 $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 [\text{N}\cdot\text{m}] - 10.72)$ を適用すると、 $\log_{10} L = 0.513 \log_{10} M_0 - 11.99$ が得られる。この式は入倉ら [13] も導いており、図 10 に示される $L - M_0$ 図上で「Shimazaki(1986) の関係式とほぼ並行でかつ Wells and Coppersmith(1994) によってコンパイルされたデータをほぼ満足しているようにみえる」と指摘している。つまり、震源断層の長さや地震規模の関係を表す松田式は日本国内の地震データだけでなく、北米中心の地震データに対しても成り立つのである。ところが、国内と海外では断層の平均幅が大きく異なるため、断層面積と地震規模の関係を求めると大きく食い違ってくるのである。

この食い違いについて最初に問題提起したのは、Somerville et al.(1993)[44] であり、武村 (1998)[46] が続いた。入倉ら (2001) も「断層長さや幅を求めるときの定義の違いかあるいは日本周辺の地域性によるものか、今後の検討が必要とされる。」[13] と提起している。

Somerville et al.(1993)[44] (入倉も共著者) は北西アメリカの 12 の地震データと日本国内の 8 の地震データからそれぞれに対して $S - M_0$ 関係式を導き、両者の違いを次のように記している。「日本の地殻内地震の断層面積は北西アメリカの地震の 0.53 倍であり、平均すべり量は 1.86 倍大きく、対応する日本の地殻内地震の静的応力降下量は平均で北西アメリカの地震の 2.6 倍大きい。日本の Slip Constant Ratio の平均は 1.57 であり、アスペリティの破壊面積の合計は断層全体の面積の 42% を平均で示している。北西アメリカではそれぞれ 1.875 と 26% である。このことは日本の地殻内地震はすべり量のコントラストが小さいアスペリティで、より広い領域が覆われていることを示す。アスペリティの絶対面積は日本の地震と北西アメリカの地震で大きな差はない。すなわち、日本の地殻内地震は北西アメリカの地震とほぼ同じ大きさのアスペリティを持っているが、すべり量の小さい領域は少ない。つまり、破壊領域全体の面積は小さい。すべり継続時間は平均して、3.6 倍日本の地殻内地震のほうが北西アメリカの地震より大きい。しかし、すべりモデルを求めたインバージョン解析に固有周期 6 秒の気象庁 1 倍強震計の変位記録を用いていることに注意が必要である。」[44]

断層モデルのパラメータ設定法は経験式に基づいており、どの地震データに依拠するかで経験式が異なってくる。Somerville et al.(1993) は、日本国内の地震データと北西アメリカの地震データをつきあわせることで、その違いを明確に記述し、今後の検討が必要であることを示唆していたのである。断層モデルがもてはやされる現在だが、20 年前にすでにその問題点が指摘されていたと言える。当時は国内地震観測記録も少なかったが、1995 年の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災を契機に強震観測計の全国ネットワークが構築され

るに伴い、M7クラスの地震観測記録が次々と収集され、震源近傍の観測記録さえ入手され始めた。ところが、国内地震データで断層モデルを再構築する動きは地震関連学界では見られない。「すでに構築」された断層モデルの「体系」を崩すことにつながるものが懸念されるからかもしれないが、重大事故につながる可能性の高い原発の耐震設計で矛盾を知りつつ地震動を過小評価し続けることは許されない。

推本ではこの問題に対して松田式で地震規模を求め、震源断層の断層モデルをそれに合わせて修正する「修正レシピ」[20]を用いることで対処しようとしている。しかし、中国電力をはじめどの電力会社も修正レシピを用いようとはせず、地震規模を過小評価する旧来の断層モデルをそのまま使って地震動を過小評価し続けている。原子力規制委員会・原子力規制庁もそれを容認してきた。今回の前原子力規制委員長代理・島崎邦彦の問題提起[40, 41, 42, 43, 47]は、客観的にはこれを断罪するものとなった。

批判の対象となった入倉孝次郎[17]は、測地データによる地殻変動量の分布と震源インバージョンによるすべり量の分布の違いに帰着させるコメントを自身のホームページで発表し、北米等と日本国内での地震データの質的な違いを否定したように見えるが、速断に過ぎる。この結論を正当化するには、国内地震観測記録に関するより詳細な検討が必要であろう。仮に、このコメントが正しいとしても、地震観測記録がない限り、すなわち、地震が起きた後でなければ入倉式を適用できないことになり、これまでの入倉式に基づく地震動解析は過小評価であることを認めたことにもなる。

推本の修正レシピも決して科学的とは言えないし、長さ20~35kmの断層では、断層面積を非現実的に拡大しすぎることにより、地震動を過小評価している可能性もある。最も科学的な方法は、これまでに得られた国内地震観測記録を集約して、日本国内に適用できる断層モデルの設定法を日本独自に開発することである。それができるまでは、入倉式の代わりに松田式等で地震規模を求めて地震動評価をやり直すか、少なくとも、推本の活断層長期評価で行っている修正レシピで地震動評価をやり直すことが不可欠である。

(ii) 断層モデルによる「応力降下量」の過小評価

断層モデルのパラメータは震源断層全体の特性を表すマクロなパラメータと、強い固着領域(アスペリティ)の特性を表すミクロなパラメータで構成される。マクロなパラメータのうち重要なものは、地震規模(地震モーメント M_0 、気象庁マグニチュード M またはモーメントマグニチュード M_W 等で表す)、断層面積 S 、短周期レベル A および断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ である。断層平均すべり量 D は地震規模と断層面積から $M_0 = \mu SD$ (μ は剛性率) で自動的に求められる。また、アスペリティに関するミクロなパラメータで重要なものは、アスペリティ面積 S_a とアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ である。これらのうち、短周期地震動を評価する際に決定的に重要なパラメータは短周期レベル

A と応力降下量 $\Delta\sigma$ および $\Delta\sigma_a$ である。これらが過小評価されれば、地震規模が大きく評価されたとしても、地震動は過小評価されてしまう。

断層モデルのレシピでは、円形破壊(円形クラック)面を仮定した次式で断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求めている。

$$M_0 = \frac{16}{7\pi^{3/2}} \Delta\sigma S^{3/2}. \quad (7)$$

この式に式(1)を適用すると、

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 2.31, & M_0 < M_{ot}; \\ 2.31\sqrt{\frac{S}{291}}, & M_0 \geq M_{ot}, \end{cases} \quad (8)$$

が得られる。つまり、未飽和断層では、断層平均応力降下量は $\Delta\sigma = 2.31\text{MPa}$ と一定になり、断層が飽和した後では、断層面積の平方根に比例する形で大きくなっていく¹⁴。

アスペリティの平均応力降下量を求める計算式は複数あり、その主なものが短周期レベル A による方法(A 法)とアスペリティ総面積を総断層面積の22%とする方法(アスペリティ総面積固定法または $S_a/S = 0.22$ 法)である。

「短周期レベル $A[\text{dyn}\cdot\text{cm}/\text{s}^2]$ 」とは「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」のことであり、「 A 法」では、まず、この値を次の経験式から求める¹⁵。

$$A = 2.46 \cdot 10^{17} M_0^{1/3}. \quad (9)$$

続いて、 r をアスペリティ総面積 S_a の等価半径、 R を断層面積 S の等価半径、 β を震源域における岩盤の S 波速度として、アスペリティ総面積 S_a を次式から求める。

$$S_a = \pi r^2, \quad (10)$$

$$r = \frac{7\pi M_0}{4AR} \beta^2. \quad (11)$$

ここでは、便宜的に震源断層とアスペリティの形状を円形と仮定しており、式(11)はシングル・アスペリティモデルにおける M_0 と A に関する次の理論式から導出している。

$$M_0 = \frac{16}{7} r^2 R \Delta\sigma_a \text{(Boatwright1988)} [1], \quad (12)$$

$$A = 4\pi r \Delta\sigma_a \beta^2 \text{(壇ほか2001)} [8]. \quad (13)$$

¹⁴断層幅 W が地震発生層下端までの最大断層幅 W_{\max} より小さい断層を「未飽和断層」といい、断層幅が地震発生層下端に到達して $W = W_{\max}$ のまま水平に長く伸びた断層を「飽和断層」という。

¹⁵短周期レベル A は、加速度震源スペクトル $S(f)$ が振動数 f の関数として $S(f) = M_0/[1 + (f/f_c)^2]$ と表せることから、 $(2\pi f)^2 S(f) = (2\pi f_c)^2 M_0/[(f_c/f)^2 + 1]$ において $f \rightarrow \infty$ とした極限 $A = (2\pi f_c)^2 M_0$ として表される。ただし、 f_c はコーナー振動数である。ここで、 $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係が成立つことから、 $A \propto f_c^2 M_0 \propto M_0^{1/3}$ の関係が成立つ。

したがって、式(12)または式(13)からアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を逆算できる。ここで、式(12)と式(7)を組み合わせると、

$$\Delta\sigma_a = \frac{S}{S_a} \Delta\sigma \quad (14)$$

という単純な式が得られる。

中国電力は、表9のように、「宍道断層（基本）」の断層パラメータをこのA法で求めている。その応力降下量は断層平均で $\Delta\sigma = 2.44\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ （アスペリティ面積比 $S_a/S = 0.173$ ）である。

ところが、A法では、地震規模が大きくなるとアスペリティ総面積 S_a が大きくなりすぎてアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ が小さくなりすぎる。そこで、断層モデルのレシピでは、長い断層で地震規模が大きい場合にはこの短周期レベルによる方法（A法）は使わないよう警告している。それに代わる方法が「アスペリティ総面積固定法」であり、アスペリティ総面積 S_a を震源断層総面積 S の22%に固定する。この方法による断層パラメータの値が表9での「修正レシピ（ $S_a/S = 0.22$ 法）」の列のパラメータ値である。

しかし、中国電力によるパラメータ値は地震規模を断層面積からM6.9として求めたものであり、これを断層長さから松田式でM7.2とする修正レシピを用いた場合には、表9のように、「断層面積変えず」、「断層幅のみ拡大」、「断層面積拡大」のそれぞれで、応力降下量が $\Delta\sigma = 5.79\text{MPa}$ 、 4.67MPa 、 3.56MPa 、および $\Delta\sigma_a = 26.3\text{MPa}$ 、 21.2MPa 、 16.2MPa と大きくなる。

島根2号における地震動評価で、耐専スペクトルと断層モデルとの間に2倍の差が見られた原因の1つは、ここにある。地震規模が過小評価された結果、応力降下量が過小評価され、地震動が過小評価される結果となったのである。

この関係は、「F-III~F-IV~F-V断層（基本）」の場合にも現われる。表10の「断層モデル（入倉式）」の「A法（中国電力）」の列が中国電力によるパラメータ値であり、松田式でM7.6とする修正レシピを用いた場合が右端2列の値である。中国電力はA法で応力降下量を断層平均で $\Delta\sigma = 3.39\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 12.7\text{MPa}$ としているが、アスペリティ面積比は $S_a/S = 0.267$ とやや過大であり、 $S_a/S = 0.22$ 法を用いた場合の $\Delta\sigma_a = 15.4\text{MPa}$ より小さくなっている。修正レシピを用いた場合には、地震規模が大きくなるため $S_a/S = 0.22$ 法を用いているが、 $\Delta\sigma = 6.40\text{MPa}$ （断層面積変えず）または 4.45MPa （断層面積拡大）、および $\Delta\sigma_a = 29.1\text{MPa}$ または 20.2MPa とかなり大きくなる。このように、中国電力は地震規模だけでなく応力降下量も過小に設定したため、耐専スペクトルと断層モデルとで2倍の開きが出たのである。

さらに、中国電力は「F-III~F-IV~F-V断層（80度傾斜）」の応力降下量として、関西電力が「FO-A~FO-B~熊川断層」に用いたと同様に、長大な断層にのみ許容される Fujii-Matsu'ura(2000)[10]の応力降下量を用いている。2016年6月10日改訂の新レシピではこれを明確

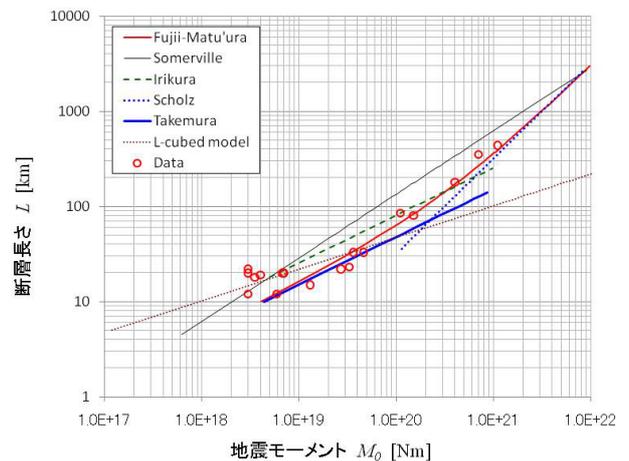


図14: Fujii-Matsu'ura[10]等によるスケーリング則の関係：Somerville(細線)、入倉(Irikura, 緑破線)、Scholz(青太点線)、武村 Takemura(青太直線)、L3乗モデル(茶細点線)、Fujii-Matsu'ura(赤太曲線)。Fujii-Matsu'uraはTakemuraとScholzに漸近し国内地震データ(赤丸)にフィットしている

に禁じており、通常の断層モデルのレシピに従うと、地震規模を入倉式で求めたとしても、 $\Delta\sigma = 3.41\text{MPa}$ と $\Delta\sigma_a = 15.5\text{MPa}$ になるが、これをそれぞれ 3.1MPa および 14.1MPa に小さく設定している。修正レシピを用いた場合には、鉛直基本の場合と同様に、 $\Delta\sigma = 6.25\text{MPa}$ （断層面積変えず）または 4.36MPa （断層面積拡大）、および $\Delta\sigma_a = 28.4\text{MPa}$ または 19.8MPa とかなり大きくなる。

(iii) 長大な断層における「応力降下量」の過小評価

地震調査研究推進本部（推本）による断層モデルのレシピでは、円形破壊面を仮定できない「内陸の長大な横ずれ断層」に対しては、データも少なく未解決の研究課題だと指摘したうえで、Fujii-Matsu'uraが横ずれ断層を対象として導出した次式を図14の地震データに回帰させて得た値 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を用いるよう推奨している。

$$M_0 = \frac{WL^2}{aL+b} \Delta\sigma. \quad (15)$$

ただし、 a と b は数値計算で得られる構造依存のパラメータであり、リソスフェアの厚さ $= 30\text{km}$ 、剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ として $a = 1.4 \cdot 10^{-2}$ 、 $b = 1.0$ を導いている。入倉(2004)[14]はこの関係式を次のように論評している。

「Matsu'ura and Sato (1997)による『2次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニック・ローディングによる有限長の断層運動のシミュレーション』を用いて導かれたものである。従って、この式自体は3次元の断層場での地震発生の理論モデルとしては不十分なものである。ただし、観測データとして得られている $M_0 - L$ 関係を説明するための経験的關係式として意味がある。式(15)の物理学的な意味での有効性については、3次元の動力学モデルに基づく理論的検証および観測データに基づく検証の両面の検討が必要とされる。」

つまり、 M_0-L 関係が経験的に式 (15) で表されるといことが重要であり、パラメータの値の妥当性については、動力学的シミュレーションや実際の地震データに基づいて検証すべきだといのである。Fujii-Matsu'ura は、上記のパラメータ値を用いて、 $W = 15\text{km}$ と設定し、地震データへの回帰計算で $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を導出しているが、その適用に際しては具体的な検証が必要なのである。

さらに、推本は 2010 年 11 月に出した「活断層の長期評価手法 (暫定版)」報告書 [21] の中で「長さが 100 km を超えるような長大な断層」(p.6) とし、また、2014 年 12 月に出した「全国地震動予測地図 2014 年版」付録 [22] の中でもスケーリング則に沿った震源のモデル化との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」と明記しており、48.0km の「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」は「長大な断層」とは言えない。参考のため、最新の同付録 [22] を以下に引用しておく。

「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層) の震源のモデル化に関する検討も必要である。長大断層については、一般的なパラメータ設定法を用いると背景領域のすべり量が負になってしまうため、強震動予測レシピ (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2008c) では暫定的に平均応力降下量とアスペリティ面積比を固定している (引用者注: レシピでは $S_a/S = 0.22$ としている)。中央構造線や糸魚川-静岡構造線といった長大断層で発生する地震の強震動予測を行うためには、長大断層に対しても背景領域のすべり量が負にならないことも含め、震源モデル作成のための枠組みが必要であり、そのような枠組みを作るための検討が必要である。近年の観測データの蓄積により、長さの短い断層から長大断層に至るまでの断層面積と地震モーメントの間の関係が報告されており (例えば, Murotani et al., 2010), これによれば、断層面積と地震モーメントの関係式は、地震の規模に従って 3 段階で変化する。また、観測データから得られる、震源モデル作成に必要な物理量の間関係式として、短周期レベル (加速度震源スペクトルの短周期側におけるスペクトルの振幅) と地震モーメントの関係式 (例えば, 壇・他, 2001) がある。長大断層の震源モデル作成については、このような観測データから得られた知見に基づき、応力降下量の適切な設定方法も含めた、新たな枠組みを示す必要がある。また、アスペリティの個数や大きさ、断層面上の分布等は、強震動に大きな影響を与える重要な要素であり、長周期帯域だけでなく広帯域にわたって強震動を予測可能な震源モデル設定の枠組みが求められる。」

つまり、「震源のモデル化」との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」が定義されており、3 段階で変化するスケーリング則の 3 番目の段階と結びつけられているのである。ここにスケーリング則とは「断層面積と地震モーメントの関係」のことであり、未飽和断層に対応する $M_0 \leq 7.5 \times 10^{18}\text{Nm}$ では $M_0 \propto S^2$ (M_0 が断層面積の 2 乗に比例), 飽和断層で長大な断層になるまでの $7.5 \times 10^{18}\text{Nm} < M_0 \leq 1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ で $M_0 \propto S^{3/2}$ (M_0 が断層面積の 1.5 乗

に比例), 長大な断層に相当する $1.8 \times 10^{20}\text{Nm} \leq M_0$ で $M_0 \propto S$ (M_0 が断層面積に比例) となる関係のことを指す。ただし、長大断層の M_0 下限値 $1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ は Murotani et al.(2010) が示した値をここでは仮に引用しているが、Murotani らは 100km を超える断層では地表最大変位量が 10m で飽和することを示し、地震モーメントが $1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ 以上の断層に対して、スケーリング則が $S[\text{km}^2] = 1.0 \times 10^{-17} M_0[\text{Nm}]$ となることを示している。この式によれば、 $M_0 = 1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ では $S = 1800\text{km}^2$ になり、断層幅が 15km でも断層長さが 120km になる。

2016 年 6 月 10 日改訂の新レシピは、推本の中ではすでに常識となっていた「長大な断層」に関する断層モデルのパラメータ設定をレシピの中に明記したにすぎない。これは別に新しい知見でも何でもないのであり、私が意見書 [30] 等の中で常に主張してきた内容にすぎない。電力会社は新レシピに従い、応力降下量の過小設定を改め、地震動評価をやり直すべきである。

さらに、Fujii-Matsu'ura モデルに関わるより重大な問題点を指摘しておく。Fujii-Matsu'ura[10][29] は断層幅より断層長さが十分長い中規模断層から長大断層を広く包含する $L-M_0$ 関係式を「観測データに基づく回帰計算」から求めたものだが、彼らの用いた地震データは図 14 の赤丸で示されるように、入倉らの用いた地震データとはかなり異なる武村のデータである。結果として、Fujii-Matsu'ura は中規模断層に対しては武村式 (図 14 の青太実線), 長大断層に対しては Scholz の式 (図 14 の青点線) [36] に漸近するように $L-M_0$ 関係式 (図 14 の赤太曲線) を導出している。中規模断層に対して、武村式ではなく入倉式に漸近するように回帰するとすれば、応力降下量は全く異なる値になると推測されるし、そもそも Fujii-Matsu'ura の式 (15) に合うように回帰できるかどうかとも疑わしい。

同じことは、伊方原発の断層モデルに用いられた壇ら (2011)[9] のモデルでも言える。壇ら (2011) も中規模地震に対して、入倉らが用いた地震データを使わず、武村の用いたデータに回帰させている。Fujii-Matsu'ura[10][29] や壇ら (2011)[9] がなぜ入倉の用いたデータを使わず、武村のデータを用いたのか、その理由は不明だが、地震データが変われば、応力降下量の値も当然変わってくるであろう。

(iv) M7 クラスの国内地震では 20~30MPa

推本は、Fujii-Matsu'ura の断層平均応力降下量 3.1MPa およびアスペリティ平均応力降下量約 14.4MPa (推本のレシピ [20] では $S_a/S = 0.215$ で計算しており、14.1MPa ではない) について「既往の調査・研究成果とおおよそ対応する数値」[20] だとしているが、少なくとも M7 クラスの国内地震データと比べると小さすぎる。鳥取県西部地震 M7.3 (2000.10.6) では 2 アスペリティで平均応力降下量は 28.0MPa と 14.0MPa と評価され [12], 能登半島地震 M6.9 (2007.3.25) では 3 アスペリティで 20MPa, 20MPa および 10MPa [24], 新潟県越前地震 M6.8 (2007.7.16) では 3 アスペリテ

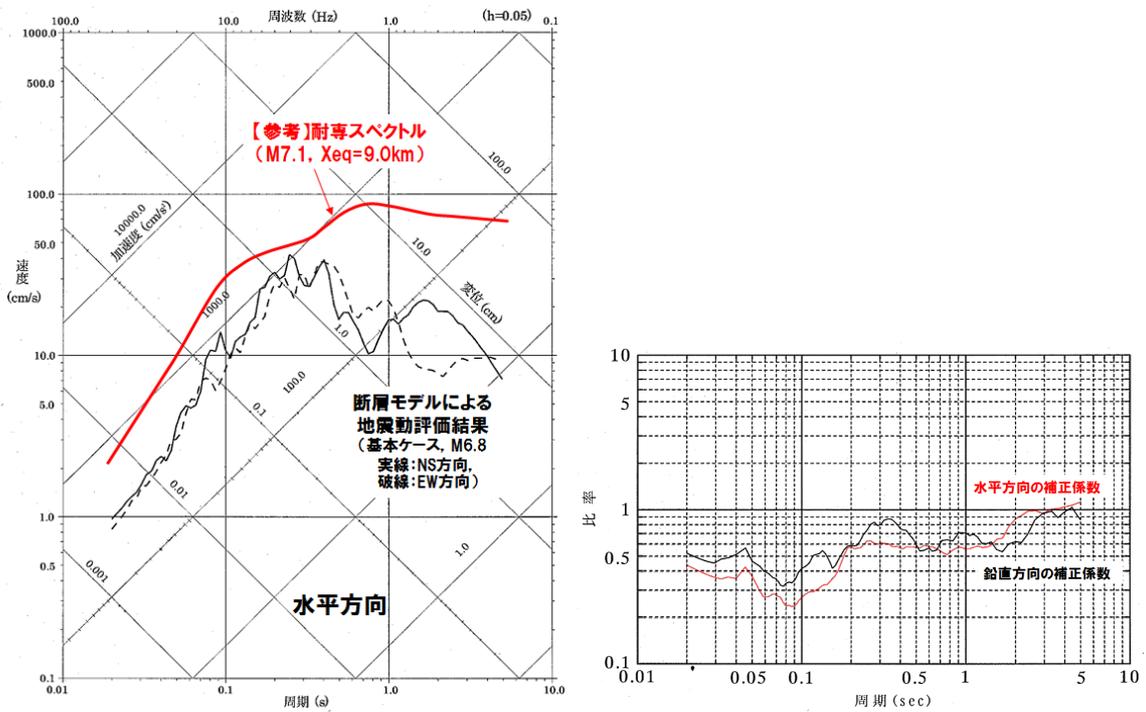


図 15: 2008 年耐震バックチェック時の宍道断層 (M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル (右図「島根原発敷地内地震観測記録による補正係数」で補正されたものだが、宍道断層が近すぎるため当時も適用範囲外とされ「参考」扱いにされている) と断層モデル (M6.8, 長さ 22km, 幅 13km) による地震動評価結果の比較 [3]

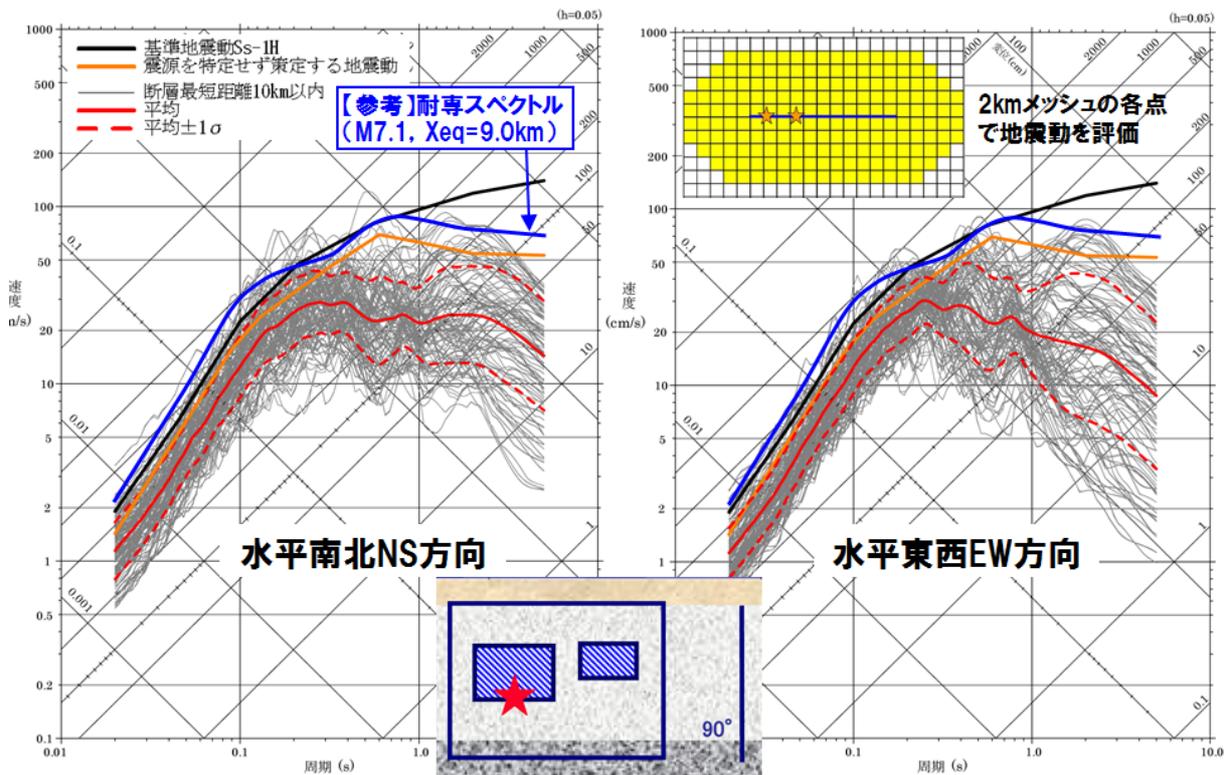


図 16: 2008 年耐震バックチェック時の宍道断層 (M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル (図 15 と同じ) と修正断層モデル (ケース 2: M7.1, 長さ 22km, 幅 15km, 破壊開始点第 1 アスぺリティ下端中央) による断層周辺極近傍観測点での評価結果の比較 [2] (いずれも、震源特性 1.5 倍化は考慮されていない。)

ィで 23.7MPa, 23.7MPa および 19.8MPa[15], 岩手・宮城内陸地震 M7.2(2009.6.14) では 2 アスぺリティで 17.0MPa と 18.5MPa[16] であった。これらを教訓として、アスぺリティの応力降下量を 20~30MPa またはそれ以上に設定すべきであろう。

(注 3) 修正レシピによる地震動評価について

断層モデルの修正レシピ [20] とは、断層面積から地震規模を算出する入倉・三宅 (2001) の手法では地震規模が過小に算定されるため、断層長さから松田式で地震規模を求め、それに合わせて断層面積を広げた上で、

応力降下量等を算出する手法である。

島根原発の2008年耐震バックチェック時には、宍道断層の断層長さは22kmと評価され、地震規模がM7.1(松田式による)ではなく入倉式でM6.8と小さく設定され、応力降下量も小さく、図15のように、当時の宍道断層(M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$)の耐専スペクトルの1/2程度にすぎなかった。この耐専スペクトルは、図15の右図の島根原発での地震観測記録で補正されたものであり、当時は断層モデルでも震源特性1.5倍化を考慮していないので、両者ともに条件は同じである。

そこで、2010年の第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3[2]では、地震規模をM7.1として震源断層の面積を少し拡張する修正レシピによって、地震動評価をやり直させた。これは推本が2008年に公表した修正レシピ[20]に基づくものであり、断層幅を13kmから15kmへ拡張し、地震モーメントをM7.1に相当する $1.06 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ とし、断層モデルのレシピに基づいて、応力降下量を断層平均で2.3MPaから4.32MPaへ、アスペリティ平均で15.1MPaから19.7MPaへ引上げ、解放基盤表面上観測点(2km間隔)での地震動を図16のように求めている。図16における最上部の地震波が極近傍の地震波であり、断層最短距離2kmに位置する島根原発の解放基盤表面での地震動評価に相当する。これと当時の宍道断層(M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$)の耐専スペクトル(内陸補正あり)はよく重なり合っている。つまり、断層モデルのレシピをそのまま適用するのではなく、松田式で求めた地震規模に合わせて断層モデルを少し修正すれば、断層モデルと耐専スペクトルによる地震動評価結果は互いによく合ってくるのである。

しかし、これを使うと通常のレシピと比べて応力降下量が大きくなるため、電力会社の中には修正レシピの適用には異論もあろうかと思われるので、参考のため、第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3(2010.3.3)速記録[2]から、徳山委員の「地震の物理からいって、あまりストレスドロップを今後バーンと上げて、そういうのがアンリアスティックだったらどうする」という質問に対する入倉孝次郎耐震安全性評価特別委員会委員長の発言を引用しておく。

○入倉耐特委委員長 私もそのとおり応力降下量を、レシピでいろいろ検討しているのですがその範囲を逸脱して計算しても、安全のためにいいと言ってもあまり説得性がない。それで先ほどの22kmに納めようとする問題があるということで、この背景の説明でよく分からなかった点があります。これは柏崎の時にもお願いしてやってもらったやつですが、地震調査委員会では長期評価と強震動評価、長期評価のいわゆる専門家というのは変動地形学であるとか、地質の専門家が評価しています。その変動地形や地質の専門家が地震規模を評価する時には、松田式しか今の点信頼出来るものがないということがあります。すると今回22kmですね。22kmを松田式を当てはめると、気象庁マグニチュードが7.1になる。それと22kmと地震発生層をモデル化

して断層面積等でやるとM_J7.1にならないということがあります。そうすると同じ国の機関がやるのに、長期評価でやっているモデルと強震動でやっているモデルがずれがあるのはおかしいのではないかとということで、それで長期評価の意見を活かして、気象庁マグニチュード7.1になるモデル化もしましょう。そうすると今、東原先生が言われた点ですね。地震発生層がある程度限られていると、地震発生層でないところがたくさん動くとするのは、やはり物理的におかしいのではないかとということがあります。しかしながら実際には長さであるとか、幅に関してある程度のばらつきがあるから、ある程度は許容して、要するに気象庁マグニチュードが7.1をモデル化するモデル化の方法を、地震調査委員会は提案しています。その場合は長さもある程度長くして、幅も長くする。これは別に物理的意味があるわけではないけれども、計算上のものですということで、気象庁マグニチュード7.1のモデル化として、LモデルというのとWモデルで計算して下さい。そうすれば一応気象庁マグニチュードを実現する地震動の計算が出来ます。これが3ページの左側のモデルだと思えます。実際には22kmと。これは変動地形とかそういう観点で22kmと決まっているのに、なぜこんなことをするのかというご意見はあると思いますが、気象庁マグニチュードを実現するためにはどうしてもこれをしないといけません。そうしないと今、徳山先生が言われたように狭いところに地震のエネルギーを閉じ込めないといけないということで、応力降下は非常に大きくなるということで、そうするとこれまでのいろいろな経験的な、地震の震源モデルの解析結果と大きくずれてしまうということがあるので、こういうふうにモデル化した。ですから、22kmというふうに決まっているけれども、ここではそれを25.7kmにして、気象庁マグニチュード7.1を計算したらどうでしょうか。これは震源が特定出来る場合の計算です。震源を特定せずではないので先ほどの説明が震源を特定せずということを強調されたので、これは震源を特定して、かつ22kmなのに、なぜM6.8でいいんですかというご意見の方は当然おられると思います。そういう人たちに気象庁マグニチュードでやった場合にM7.1になるのなら、それで計算して比較してみましょう。これはやはり確認用の地震動として計算して、今徳山先生が言われるような考えで、応力降下量を無理やり上げるのではなくて、応力降下量は保存して、そのかわり長さ、幅は多少ばらつきの範囲内で動かすということで計算する。これは柏崎の時にも原子力安全委員会でお願ひして、確認用地震動として計算していただいたものをここでもやっていただくということでよろしいのではないのでしょうか。

参考文献

- [1] Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 489-508
- [2] 中国電力(2010): 島根原子力発電所基準地震動S_sの策定について、第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3 第62-7号および速記録(2010.3.3)

- [3] 中国電力(2010): 島根原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書(2008年3月), IV 基準地震動の策定(2010.3.28)
- [4] 中国電力(2016): 島根原子力発電所基準地震動の策定について, 島根原子力発電所2号炉審査資料, 資料番号 EP(E)-040 改01(2016.3.2)
- [5] 中国電力(2016): 島根原子力発電所敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について, 島根原子力発電所2号炉審査資料, 資料番号 EP(E)-036 改02(2016.3.2)
- [6] 中国電力(2016): 島根原子力発電所基準地震動の策定について, 島根原子力発電所2号炉審査資料資料番号 EP(E)-040 改02(2016.6.15); 島根原子力発電所敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について(コメント回答), 同 EP(E)-041(2016.6.15)
- [7] 脱原発護国全国連絡会(2016): 原子力規制委員会による入倉・三宅(2001)式適用の見直しに関する要請書(2016.6.23) <http://www.datsugenpatsu.org/bengodan/statement/16-06-23/>
- [8] 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透(2001): 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62
- [9] 壇一男・具典淑・入江紀嘉・アルズベイマサマン・石井やよい(2011): 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第670号, 2041-2050.
- [10] Fujii Y. and Matsu'ura M. (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, *Pure appl. Geophys.* 157, 2283-2302
- [11] 原子力安全・保安院耐震安全審査室(2012): 活断層による地震動評価の不確かさの考慮について(考え方の整理)(2012年8月17日)
- [12] 池田隆明・釜江克宏・三輪 滋・入倉孝次郎(2002): 経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集 第561号, 37-45
- [13] 入倉孝次郎・三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875
- [14] 入倉孝次郎(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
- [15] 入倉孝次郎・香川敬生・宮腰研・倉橋奨(2007): 2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか?—(2007年12月24日修正版)
- [16] 入倉孝次郎・倉橋奨(2008): 「2008年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動—なぜ4000ガルの強震動が生成されたのか?—」, 日本活断層学会2008年度秋季学術大会
- [17] 入倉孝次郎(2016): 島崎邦彦氏の日本地球惑星科学連合2016年大会(2016/05/25)での発表「過小な日本海「最大クラス」津波断層モデルとその原因-入倉・三宅(2001)式について」へのコメント(2016.6.24) http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/comment_final-revision3.pdf
- [18] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002): 糸魚川-静岡構造線断層帯(北部, 中部)の地震を想定した強震動評価
- [19] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2005): 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 分冊2「震源断層を特定した地震動予測地図の説明(平成17年3月23日, 平成18年9月25日改訂)」
- [20] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2008): 「全国を概観した地震動予測地図」2008年版, 付録3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」)(平成20年4月11日改訂), 46-74
- [21] 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会(2010): 「活断層の長期評価手法」報告書(暫定版)(2010.11.25)
- [22] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2014): 全国地震動予測地図2014年版~全国の地震動ハザードを概観して~, 付録-1「10. 今後の課題と展望」10.1.2 活断層で発生する地震のモデル化」, p.385(2014.12)
- [23] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」)(平成28年6月10日改訂) http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf
- [24] 釜江克宏・池田隆明・三輪滋(2003): 2007年3月25日能登半島地震(MJ6.9)の震源のモデル化
- [25] 関西電力株式会社(2014): 高浜発電所地震動評価について, 第131回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料1-3(2014.8.22)
- [26] 関西電力株式会社(2015): 大飯発電所地震動評価について, 第206回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料3-4(2015.3.13)
- [27] 九州電力(2014): 川内原子力発電所 基準地震動の策定について(コメント回答), 第92回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料3-1(2014.3.12)
- [28] 松田時彦(1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第2輯, 第28巻, 269-283.
- [29] Matsu'ura M. and Sato T.: "Loading Mechanism and Scaling Relations of Large Interplate Earthquakes," *Tectonophysics*, 227, pp.189-198 (1997)
- [30] 長沢啓行(2014): 大飯3・4号と高浜3・4号の耐震安全性は保証されていない, 若狭ネット第147号, 6-27(2014/1/14) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/147.pdf>
- [31] 長沢啓行(2015): 高浜3・4号と川内1・2号の真逆の仮処分決定が意味するもの, 鹿児島地裁への意見書(2015.9.21) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/senikensho.pdf>
- [32] 長沢啓行(2015): 高浜3・4号と大飯3・4号の基準地震動は過小評価されている, 福井地裁への意見書(2015.10.1) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/otikensho.pdf>
- [33] 長沢啓行(2015): 伊方3号の基準地震動は過小評価されている, 松山地裁への意見書(2015.12.20) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/ikata201512.pdf>
- [34] 長沢啓行(2016): 島根2号の基準地震動は過小評価されている, 広島高裁松江支部への意見書(2016.5.10) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/Shimane20160510.pdf>
- [35] 佐藤良輔編著, 阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典(1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 105-381
- [36] Scholz, C. H.(2002): *The Mechanics of earthquakes and faulting*, second edition, Cambridge University Press
- [37] 四国電力株式会社(2014): 伊方発電所地震動評価 震源を特定して策定する地震動(中央構造線断層帯地震動評価)と基準地震動の策定(コメント回答), 第156回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料1-1(2014.11.7)
- [38] 四国電力株式会社(2014): 伊方発電所地震動評価 震源を特定せず策定する地震動と基準地震動の策定(コメント回答), 第173回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料2-1(2014.12.12)
- [39] Shimazaki, K.(1986): Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Earthquake Source Mechanics*, *Am. Geophys. Union Geophys. Monogr.*, 37, 209-216.
- [40] 島崎邦彦(2015): 活断層の長さから推定する地震モーメント, 日本地球惑星科学連合2015年大会, SSS28-07(2015.5.28) <http://www2.jpgu.org/meeting/2015/session/PDF/S-SS28/SSS28-07.pdf>
- [41] 島崎邦彦(2015): 活断層長に基づく地震モーメントの事前推定, 日本地震学会2015年度秋季大会, S17-10(2015.10.28)
- [42] 島崎邦彦(2015): 活断層の長さから推定される地震モーメント 日本海「最大」クラスの津波断層モデルについて, 日本活断層学会2015年度秋季学術大会, O-13(2015.11.27-28)
- [43] 島崎邦彦(2016): 過小な日本海「最大クラス」津波断層モデルとその原因, 日本地球惑星科学連合2016年大会, HDS19-12(2016.5.25) <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2016/subject/HDS19-12/programpage>
- [44] Somerville, P. G., 入倉孝次郎, 澤田純男, 岩崎好規則, 田居優, 伏見実(1993): 地震断層のすべり変位量の空間分布の検討, 第22回地震工学研究発表会, 291-294.
- [45] Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80
- [46] 武村雅之(1998): 日本列島における地殻内地震のスケールン規則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震第2輯, 51, 211-228.
- [47] 田中俊一委員長・石波明委員と島崎邦彦前原子力規制委員会委員長代理との面会動画(2016.6.16) <http://www.nicovideo.jp/watch/1466146816> または <https://www.youtube.com/watch?v=zFxKpKICQ3o>
- [48] 若狭ネット編集局(2014): 「高浜3・4号と大飯3・4号に則した耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価に関する2014年3月18日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料 <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/appeal20140324.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318r.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318m.pdf>
- [49] 若狭ネット編集局(2016): 「2016年熊本地震を踏まえた川内原発の基準地震動に関する2016年5月23日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料 <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/pnrc20160531a.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/Appeal20160531.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrcrc20160523.pdf>
- [50] Yamanaka Y. and Shimazaki K.(1990): Scaling Relationship between the Number of Aftershocks and the Size of the Main Shock, *J. of Physics of the Earth*, Vol.38, No.4, pp.305-324(1990)