

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

大阪府立大学名誉教授 長沢啓行 (生産管理システム)

関西電力は2013年7月8日、大飯3.4号と高浜3.4号の原子炉設置変更許可申請書 [20, 21] を原子力規制委員会へ提出し、2014年1月10日現在なお審査中である。いずれの場合も、表1のように、耐震設計審査指針が2006年に改定された後のバックチェック段階（2008年中間報告および2010年原子力安全・保安院報告）で基準地震動の引き上げを余儀なくされている。

今回の申請では、さらに、沖合のFO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を基本ケースとして不確かさを考慮した地震動評価を行うよう指示された。その結果、高浜原発では、耐専スペクトル¹が基準地震動を超えたため、基準地震動 S_s を最大加速度の水平成分で550ガルから700ガルへ、鉛直成分で367ガルから467ガルへそれぞれ約27%引き上げざるをえなくされている。また、大飯原発では短周期の地震動レベルを1.5倍にした断層モデル²の評価結果が周期0.02secで759ガルとなり、その他の周期と合わせて6カ所で基準地震動 S_s -1H (S_s -1の水平成分)を超えたため、基準地震動 S_s (S_s -1と断層モデルによる地震動 S_s -2, S_s -3からなる)の変更を検討中である。

つまり、今回の設置変更許可申請書に記載された基準地震動 S_s では耐震安全性が保証されていないことが明らかになったのである。しかし、これは事柄の発端に過ぎない。耐専スペクトルには、1995年阪神・淡路大震災の兵庫県南部地震M7.3をはじめ、それ以降に強化された強震観測網によって最近約20年間に収集された震源近傍を含む国内地震観測記録が反映されていないという問題点

¹耐専スペクトルとは、「地震の気象庁マグニチュード」と「震源断層との等価震源距離 X_{eq} 」から地震による揺れの大きさを応答スペクトルで表したものである。また、応答スペクトルとは、地震動による施設の揺れの最大値を応答加速度や応答速度で表し、それを施設の固有周期ごとにグラフ化したものである。

²断層モデルとは、震源断層を長方形で表し、それを格子状のメッシュに切り、小断層のそれぞれから地震波が発生すると見なし、観測点でこれらの地震波を足し合わせて地震動を求めるもので、シミュレーションモデルの一種である。震源断層面内で強く固着した部分をアスペリティと呼び、これに対応する複数の小断層からは強い地震波が出ると仮定する。

がある。断層モデルには、モデル作成の元データが北米中心の地震データであり、国内の活断層による地震（内陸地殻内地震）を過小評価しているという問題点がある。これらの問題点を解決すれば、基準地震動をさらに大きくせざるをえないことは必至である。また、地震観測記録には「倍半分」のバラツキ（偶然変動）があり、2倍程度の余裕がなければ「安全性が保証された」とは言えない。

ここでは、最近20年間の地震観測記録を含めた国内地震データに基づいて耐専スペクトルや断層モデルを構築し直し、地震動のバラツキを考慮すれば、大飯・高浜原発の基準地震動を1000ガル以上に大きく引き上げざるを得ないこと、その結果、両原発とも耐震安全性を保証できなくなり、閉鎖する以外にないことを具体的に示す。

高浜原発の基準地震動引き上げが示すもの

関西電力は、高浜原発の基準地震動を約27%引き上げたが、それは図1に示されるFO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を基本ケースとして考慮した結果である。2013年7月の高浜3.4号の設置変更許可申請書では、基準地震動 S_s は図2~4の太実線（折れ線グラフ）のように水平成分 S_s -Hと鉛直成分 S_s -V (S_s -Hの2/3)が与えられ、周辺の活断層による地震動は耐専スペクトルと断層モデルのいずれも基準地震動以下に収まっていた。

ところが、FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を評価したところ、耐専スペクトルの水平成分は、図5のように「基本ケース（上端4km、傾斜角90度）」、「上端3kmケース」、「アスペリティ塊ケース」および「アスペリティ横長ケース」（図7参照）で最大加速度550ガルの水平基準地震動 S_s -Hと周期0.1sec以下でほぼ重なるか、わずかに上回り、「傾斜角75度のケース」で完全に超えてしまったのである。そこで、関西電力は基準地震動を図5の最上部の太実線折れ線グラフのように、最大加速度700ガル（周期0.02secでの応答加速度に相当

表 1: 各原発の解放基盤表面位置, せん断波速度および基準地震動の水平動 (鉛直動) の最大加速度の推移

原発名	解放基盤表面位置, S 波速度 EL., V_s (注 1)	設置許可時 限界地震の 基準地震動 S_2	2008 年 3 月 中間報告 基準地震動 S_s	2010 年原子力 安全・保安院 報告 S_s (注 2)	クリフエッジ [炉心溶融事故] αS_s (gal) (注 3)	2013 年 12 月 原子力規制委員会 審議会 S_s (注 4)
もんじゅ	+8.5m, 1900m/s	466 gal	600 (400) gal	760 (507) gal	未評価	未申請
敦賀原発	-10m, 1600m/s	532 gal	650 (433) gal	800 (533) gal	1.77 S_s (1,420)	未申請
美浜原発	-10m, 1650m/s	405 gal	600 (400) gal	750 (500) gal	1.76 S_s (1,320)	未申請
大飯原発	+3.9m, 2240m/s	405 gal	600 (400) gal	700 (467) gal	1.80 S_s (1,260)	変更を検討中
高浜原発	+1.0m, 2240m/s	370 gal	550 (367) gal	550 (367) gal	1.77 S_s (973)	700 (467) gal

- 注 1: 美浜は 1 号 EL.-14.0m, 2 号 EL.-15.5m, 3 号 EL.+1.0m の平均, 大飯は 1-2 号 EL.+3.9m, 3-4 号 EL.+6.0m の平均, 高浜は 1-2 号 EL.+1.0m, 3-4 号 EL.+1.5m の平均である (EL: 標高) (gal = cm/s²)
- 注 2: 2010 年に原子力安全・保安院報告が出されたのは, もんじゅ (3 月 15 日に最終報告), 美浜 1 号, 大飯 3-4 号および高浜 3-4 号 (11 月 29 日に中間報告への評価結果のみ) であり, 敦賀原発については 2009 年 11 月段階で審議中のままに留まっている. 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による福島第一原発事故の後のストレステストではこれらの基準地震動をベースにクリフエッジが評価されている.
- 注 3: クリフエッジとは地震動が基準地震動 S_s の何倍を超えると炉心溶融事故に至るかを示すもので, αS_s で表し, その最大加速度 (S_s の最大加速度の α 倍) を括弧内に示している. 大飯 3-4 号ではストレステスト (一次評価) 評価結果が 2012.2.13 に原子力安全・保安院から出ており, 1.80 S_s と評価されている. その 7 月後の 2012.9.3 に高浜 3-4 号の評価結果が出て, 1.77 S_s とされている. 原子力安全・保安院によって評価結果が出ているのは, 伊方 3 号 (2012.3.26) の 1.5 S_s (855gal), 川内 1-2 号 (2012.9.3) の 1 号 1.86 S_s (1,004gal), 2 号 1.89 S_s (1,020gal), 泊 1-2 号 (2012.9.3) の 1.86 S_s (1,023gal) の計 9 基だけである. 美浜原発では 3 号について関西電力の一次評価結果 (2011.12.21) で 1.76 S_s , 敦賀原発では 2 号について日本原子力発電の一次評価結果 (2012.4.19) で 1.77 S_s であり, これらについては原子力安全・保安院が「評価中」の段階で解散している. ちなみに, 原子力安全・保安院の評価結果の出た 9 基のうち原子力安全委員会の確認を終了したのは大飯 3-4 号だけであり, 伊方 3 号が 2012.3.26 に原子力安全委員会へ報告されたに留まり, 他の 6 基は報告すらされていない.
- 注 4: FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮したケースにおいて, 高浜原発では耐専スペクトルが基準地震動を超えたため, 水平 700(鉛直 467)gal への引き上げを提案し, 審議中である. 大飯原発でも, 短周期の地震動レベルを 1.5 倍にしたケースの地震動が周期 0.02sec で水平 759gal と基準地震動 S_s -1H を超えたため, 基準地震動 S_s の変更を検討中である.

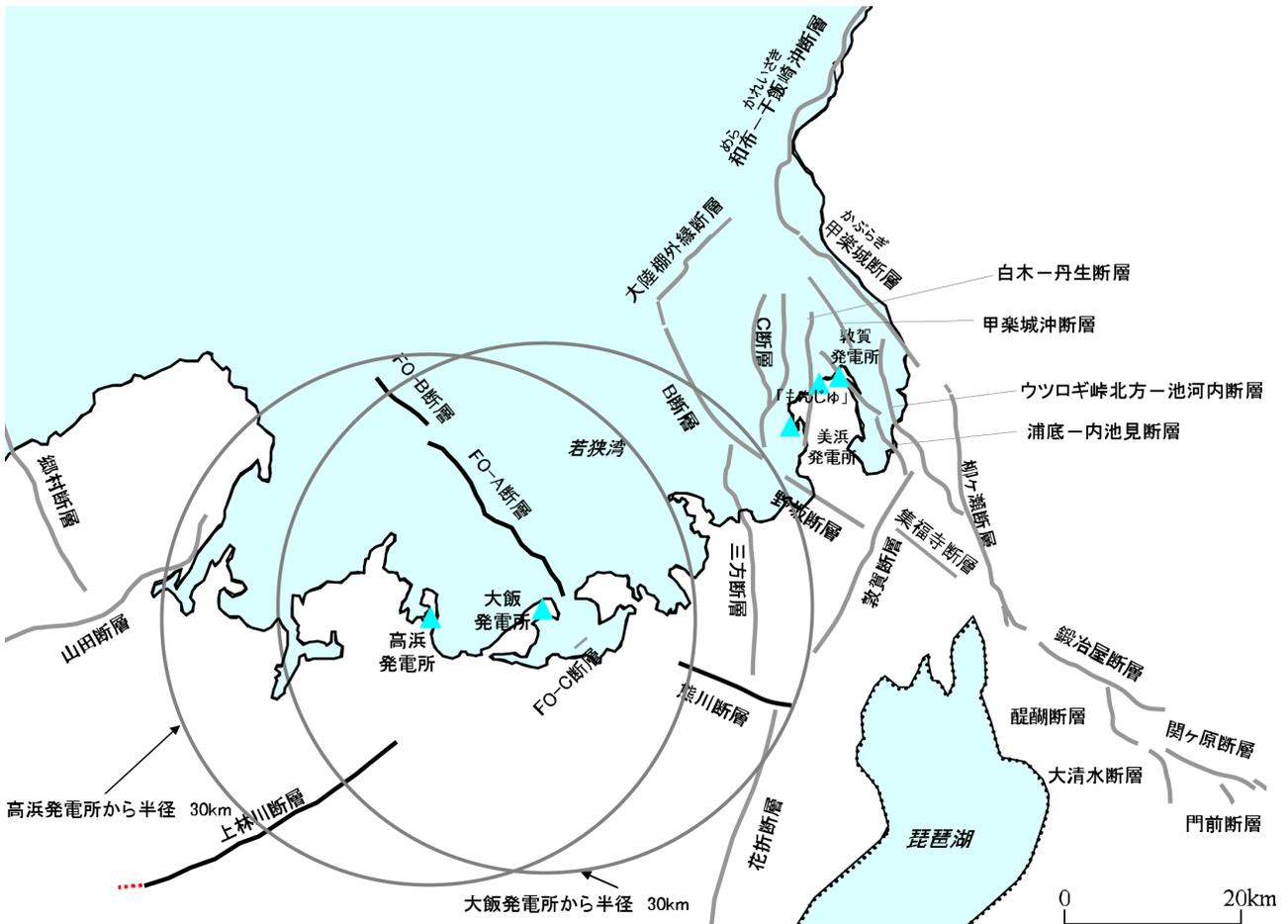


図 1: 若狭湾周辺と大飯・高浜原発 30km 圏の活断層群 [23]

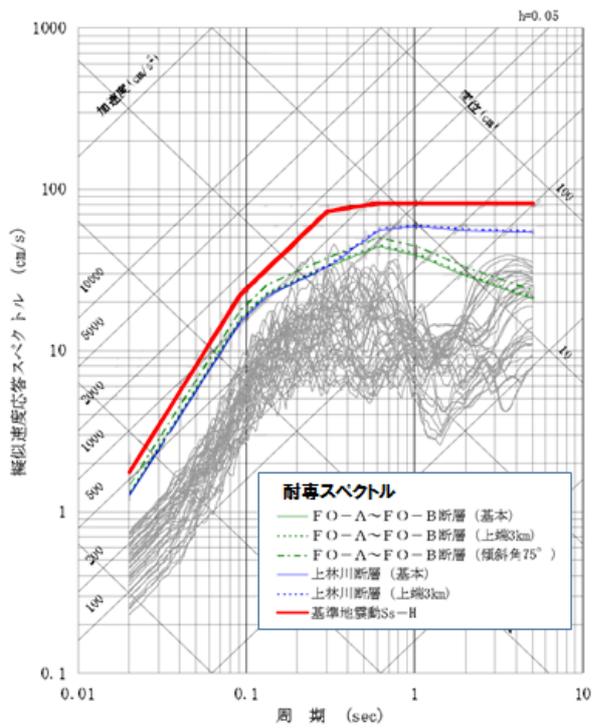


図2: 高浜原発におけるFO-A~FO-B断層・上林川断層に対する耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: NS方向)および基準地震動 Ss-H(2013年7月設置変更許可申請時)[21, 23]

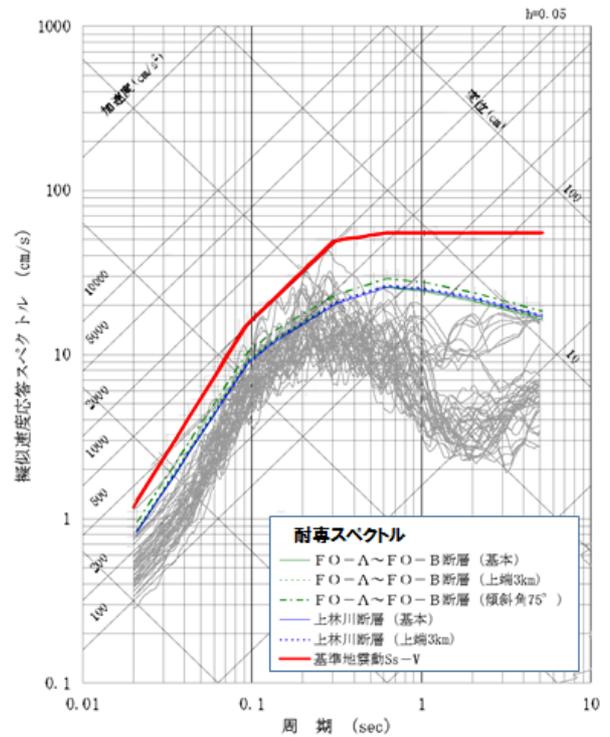


図4: 高浜原発におけるFO-A~FO-B断層・上林川断層に対する耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: 鉛直方向)および基準地震動 Ss-H(2013年7月設置変更許可申請時)[21, 23]

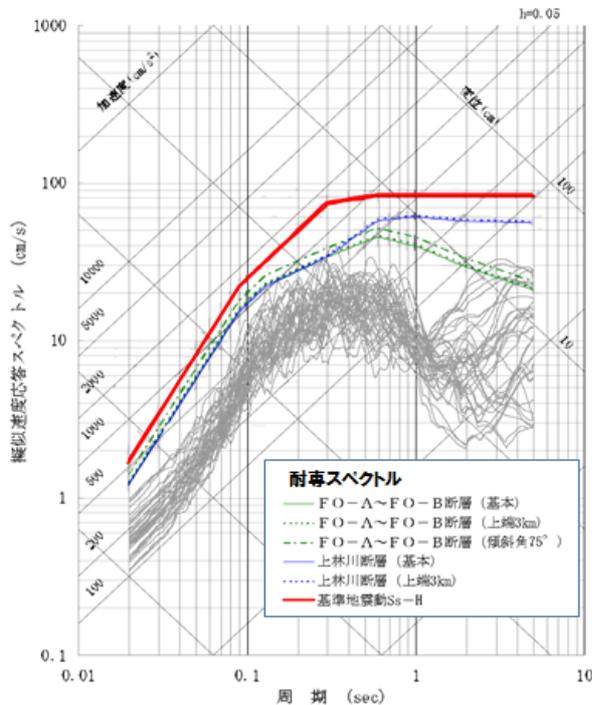


図3: 高浜原発におけるFO-A~FO-B断層・上林川断層に対する耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: EW方向)および基準地震動 Ss-H(2013年7月設置変更許可申請時)[21, 23]

する)の基準地震動へ引き上げた。

耐専スペクトルの鉛直成分は周期約0.1sec以下で水平成分の約0.6倍になっているため、Ss-Hの2/3で作成されている鉛直基準地震動 Ss-V (最大加速度367ガル)に対し、図6のように「基本ケース」等では下回り、「傾斜角75度のケース」でほぼ重なる程度である。しかし、Ss-VはSs-Hの2/3となるように作成されているため、こちらも最大加速度467ガルの基準地震動へ引き上げられた。

耐専スペクトルは、その元データとなる内陸地殻内地震の国内観測記録が少なく、最近約20年間の震源近傍を含むM7クラスの強震観測記録が反映されていないという問題点があり、これを見直せば、高浜原発の基準地震動が一層大きく引き上げられる可能性がある。これについては後述することにして、ここでは、高浜原発の基準地震動見直しに伴って明らかになった事実、すなわち、断層モデルによる地震動過小評価について述べる。

図2~4の重なり合った薄灰色波線が断層モデルによる地震動評価結果である。FO-A~FO-B断層と上林川断層のそれぞれに「基本ケース(上端4km,

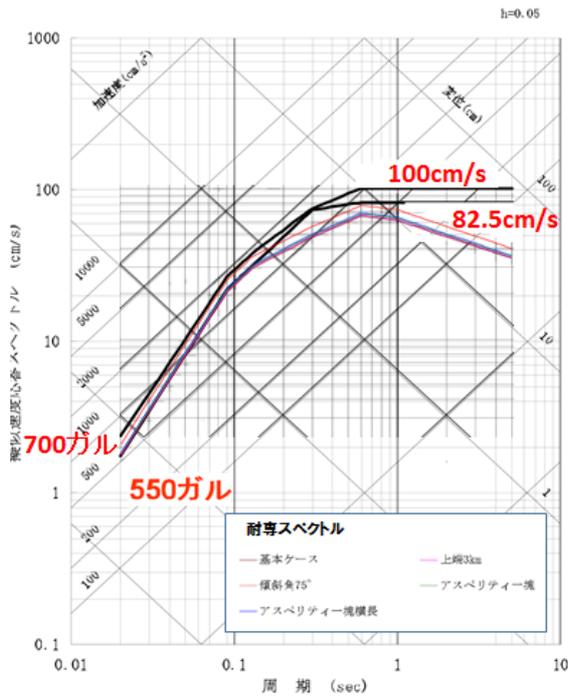


図 5: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-H(水平方向)(2013 年 12 月)[23]

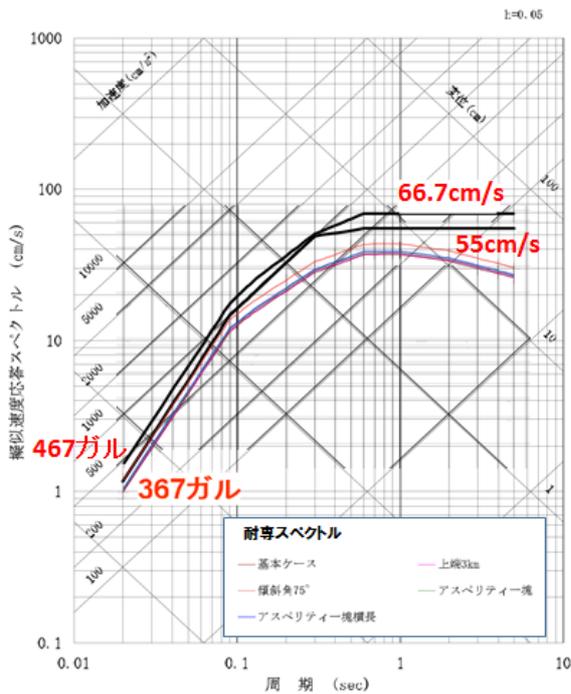


図 6: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合の耐専スペクトルと新・旧基準地震動 Ss-V(鉛直方向)(2013 年 12 月)[23]

傾斜角 90 度)」を設定し、不確かさとして「上端 3km ケース」と「短周期の地震動レベル 1.5 倍ケース」を考慮し、FO-A~FO-B 断層については「傾斜角 75 度ケース」も考慮している。さらに、破

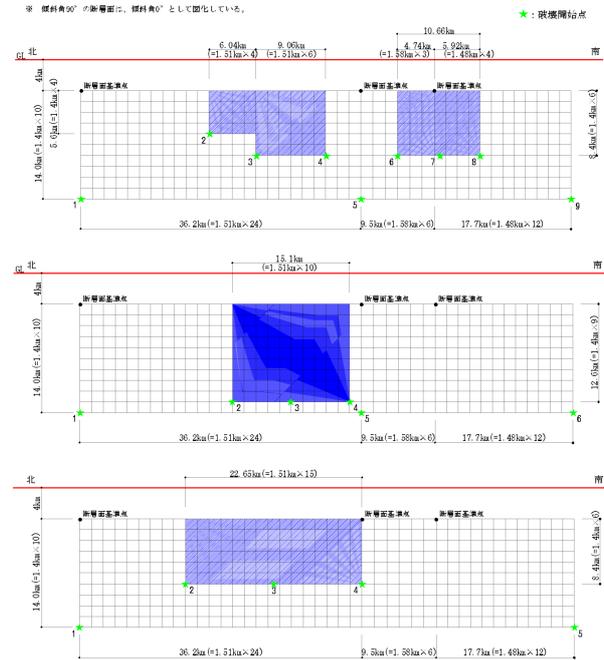
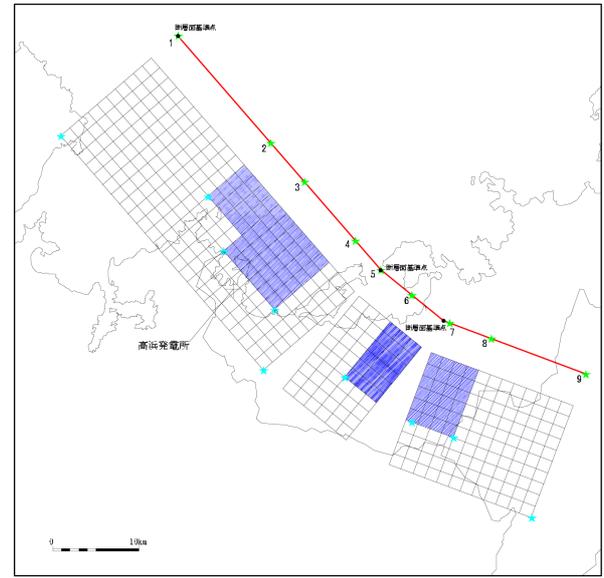


図 7: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した断層モデル (上 2 つが「基本ケース」, 下 2 つが不確かさを考慮した「アスペリティーが塊のケース」と「横長のケース」) [23]

壊開始点を各ケースに対して 6 種類設定している。これら全ケースに対する地震動評価結果が図 2~4 に表示された波線の重なりである。

鉛直成分の図 4 では耐専スペクトルとほぼ整合していると言えるが、図 2 と図 3 では、周期 0.02~0.1sec の短周期領域で断層モデルの評価結果は耐専スペクトルの 1/2 以下である。FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合には、この差がさらに拡大し、図 8 と図 9 では、断層モデルによる地震動評価結果は耐専スペクトルの 1/2~1/3 に

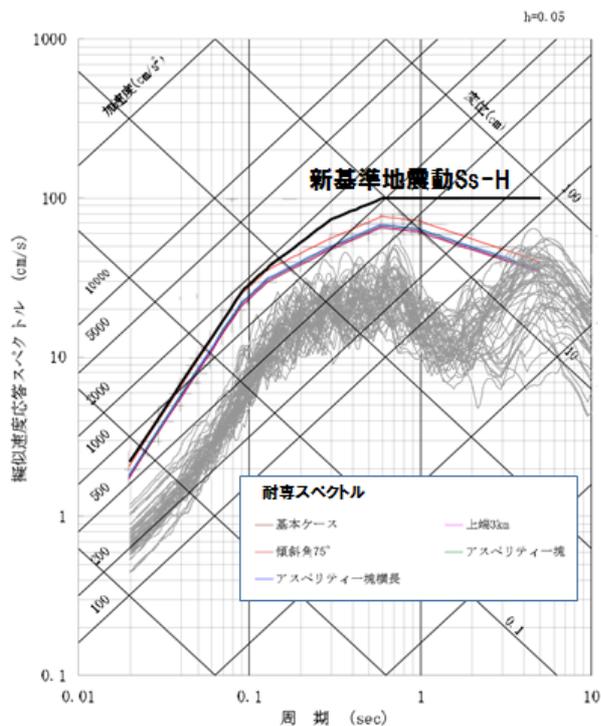


図 8: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の運動を考慮した場合の耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: NS 方向)および新基準地震動 Ss-H (水平方向) (2013 年 12 月)[21, 23]

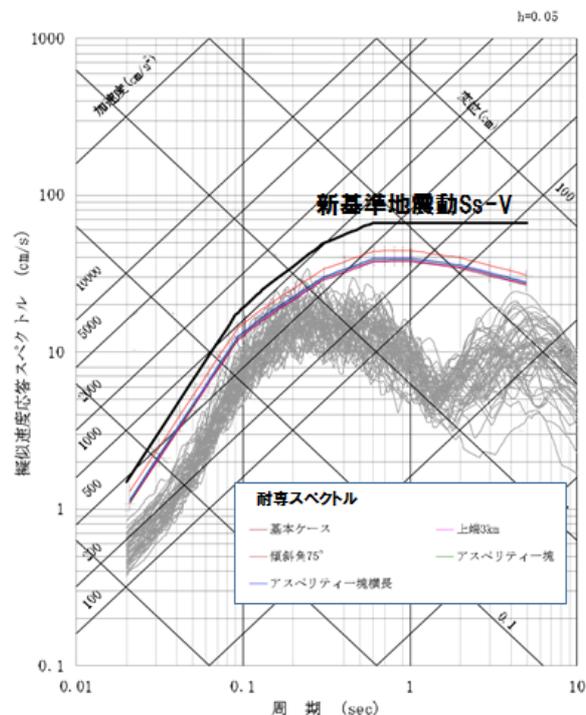


図 10: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の運動を考慮した場合の耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: UD 方向)および新基準地震動 Ss-V (鉛直方向) (2013 年 12 月)[21, 23]

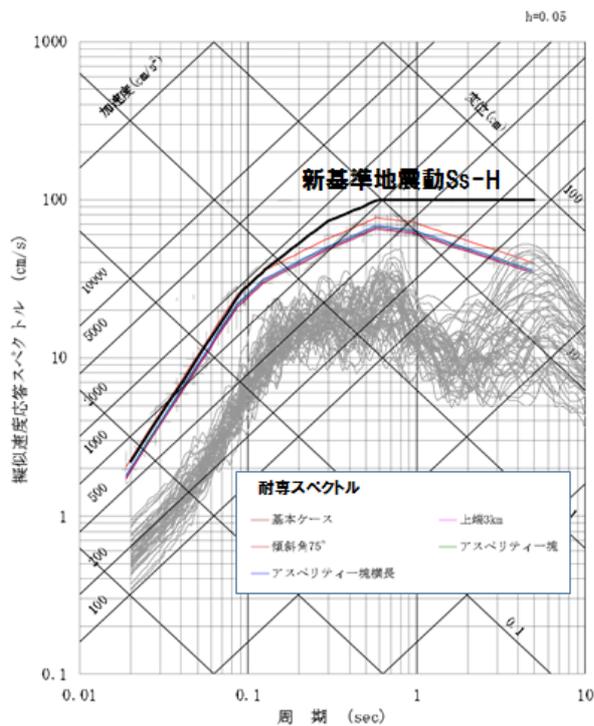


図 9: 高浜原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の運動を考慮した場合の耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価結果(全ケース: EW 方向)および新基準地震動 Ss=H (水平方向) (2013 年 12 月)[21, 23]

なり、原発にとって重要な短周期領域 0.03~0.5sec (巻末の注 1 参照) の全域に広がっている。鉛直成分についても、図 10 のように、0.1sec 以下の短周期領域で断層モデルによる地震動評価結果は耐専スペクトルの 1/2 程度になっている。

つまり、断層モデルによる地震動評価は耐専スペクトルと比較して 1/2~1/3 に過小評価されているのである。高浜原発における今回の地震動評価結果はこのことを如実に示したと言える。

なぜこうなるのか？

それは、耐専スペクトルが国内の地震データに基づいて作成されているのに対し、断層モデルは北米中心の地震データに基づいて作成されており、日本国内の活断層にそのまま適用すると、地震規模や応力降下量が過小評価されるからである。このからくりを次に明らかにしよう。

断層モデルによる地震規模の過小評価

ここで、「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」)[14, 16]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」[9, 10]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[13]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」)[14]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。[14]この考え方に基づき、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。2009年12月21日改訂版[16]が最新のレシピである。

中でも、2008年4月11日の改訂[15]は断層モデルのパラメータ設定に本質的な修正を加えたものである。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[24](巻末の注2参照)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のである。以下ではこれを「修正レシピ」とよぶ。

まず、断層モデルのレシピ自身に含まれる問題点について述べる。

表6に「FO-A~FO-B断層(基本ケース)」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 $L = 35.3\text{km}$ から松

田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ を使って地震規模がM7.4(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 $S = 494.2\text{km}^2$ から次式の下段の式を使って地震モーメント $M_o = 1.36 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ (M7.2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らない飽和状態 $W = W_{\max}$ にな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6に示すとおり、松田式によるM7.4は地震モーメントで $M_o = 2.39 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ 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半分程度になる。これでは震源断層から半分程度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こと、Somerville et al.(1993)[30]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)[9]の図11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.[31]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[32]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14の点線で示し、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」[32]と断じている。

$S - M_o$ 関係を示す図11の一点鎖線は

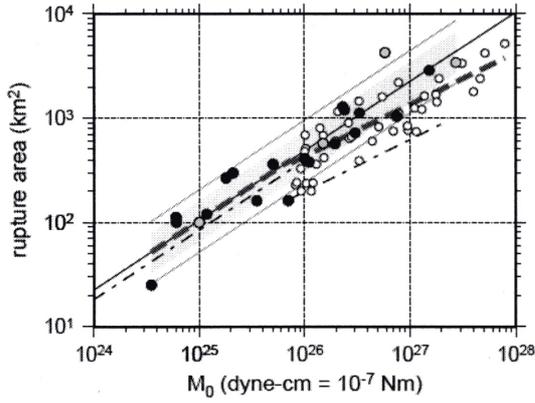


図 11: 断層面積 S (rupture area) と地震モーメント M_0 の関係 [9] (破線がレスピの式に相当, 入倉らは $L = 20\text{km}$ で $W_{max} = 16.6\text{km}$ に達すると仮定し, 分岐点を $M_0 = 7.5 \cdot 10^{25}\text{dyn}\cdot\text{cm}$ としている. 一点鎖線は武村 (1998) による $W_{max} = 13\text{km}$ とした関係式で分岐点の M_0 は同じ)

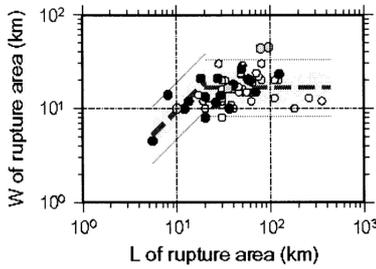


図 12: 入倉ら [9] による $L - W$ の関係 (○は Well et al.(1994)($M_{0t} < M_0$), ●は Somerville et al.(1999) および Miyakoshi(2001), 灰色の○は低角逆断層のデータ)

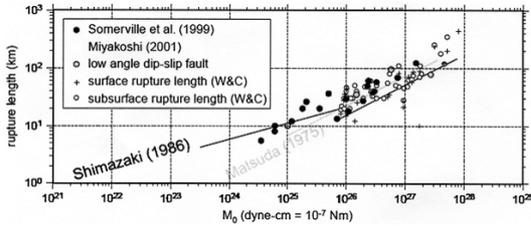


図 13: 断層長さ L (rupture length) と地震モーメント M_0 の関係 [9] (薄い線が松田式に相当)

$$\log_{10} S = \begin{cases} \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 14.74, & M_0 < M_{0t}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_0 - 10.71, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \quad (2)$$

または,

$$S = \begin{cases} 1.82 \times 10^{-15} M_0^{2/3}, & M_0 < M_{0t}; \\ 1.95 \times 10^{-11} M_0^{1/2}, & M_{0t} \leq M_0. \end{cases} \quad (3)$$

と表される武村の式であり, 図 14 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」[27] で体系的に整理され

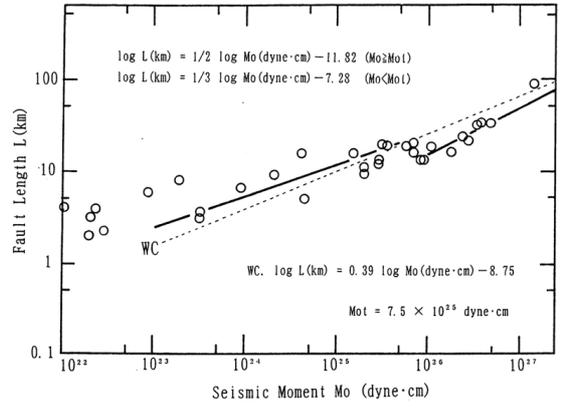


図 14: 武村 [32] による $L - M_0$ の関係

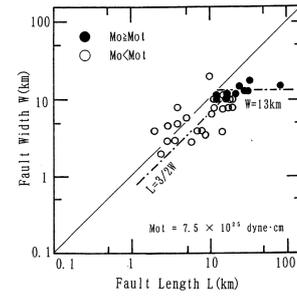


図 15: 武村 [32] による $L - W$ の関係

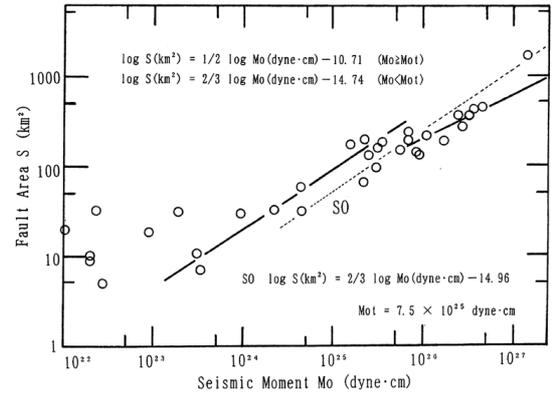


図 16: 武村 [32] による $S - M_0$ の関係

た地震データの 33 の内陸地殻内地震を使っている. 図 11 の入倉式 (太い破線) 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 $S - M_0$ 関係式は, 最初に図 14 の国内地震データに対して $L - M_0$ 回帰式を

$$\log_{10} L = \begin{cases} \frac{1}{3} \log_{10} M_0 - 7.28, & M_0 < M_{0t}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_0 - 11.82, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \quad (4)$$

と導き, 国内データでは断層幅が

$$W = \begin{cases} \frac{2}{3}L, & M_0 < M_{0t}; \\ 13, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \quad (5)$$

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、 $M_0 \geq M_{0t}$ (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)[29] 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

$$\log_{10} L = \begin{cases} 0.281 \log_{10} M_0 - 5.98, & M_0 < M_{0t}; \\ 0.524 \log_{10} M_0 - 12.44, & M_{0t} \leq M_0, \end{cases} \quad (6)$$

の関係式を導き、 $M_0 < M_{0t}$ では $M_0 \propto L^3$ 、 $M_{0t} \leq M_0$ 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いる。つまり、武村は、このスケーリング則が図 14 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 $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0[\text{N}\cdot\text{m}] - 10.72)$ の関係を適用すると、 $\log_{10} L = 0.513 \log_{10} M_0 - 11.99$ が得られる。この式は入倉ら [9] も導いており、図 13 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)[30] であり、武村 (1998)[32] 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。」[9] と提起しながら、その後検討された形跡はない。

Somerville et al.(1993)[30] (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。」[30]

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」[15]を用いることで対処しようとしている。しかし、関西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。

推本の修正レシピも決して科学的とは言えないし、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。最も科学的方法は、これらの国内地震データを集約して、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、推本の活断層長期評価で行っているように、断層長さから松田式で地震規模を求めて断層モデルのレシピを適用するか、少なくとも、推本の修正レシピで地震動評価をやり直すことが必要である。

ちなみに、2006年の中央防災会議第26回「東南海、南海地震等に関する専門調査会」では、国内の主要活断層に対し、将来起こりうる地震の規模を推定するため各種推定式を適用して図17の結果を得ている[3]。地震規模はモーメントマグニチュード M_W で示されているが、どの活断層においても、武村(断層面積)、武村(断層長さ)、Shimazaki, Fujii-Matsu'ura, Irikura et al.(入倉式)の順で地震規模が小さくなり、断層モデルのレシピで使われている入倉式で最も小さい地震規模になることは明白である。同専門調査会では推定結果がこのように非常にばらついていたため、独自に回帰式を作成し、◇で示される関係式を導いている。具体的には、断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で地震規模(気象庁マグニチュード M)を求め、国内地震データのモーメントマグニチュード M_W と M の関係式 $M_W = 0.88M + 0.54$ を求め、 $\log_{10} M_o = 1.5M_W + 9.1$ で地震モーメントに変換している。当然のことではあるが、国内地震データに回帰させているため、同専門調査会の推定結果は武村(断層長さ)や Shimazaki の結果とほぼ同じである。

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

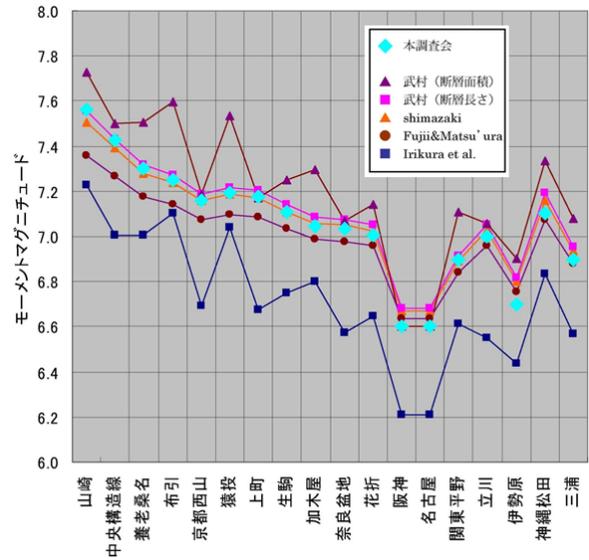


図17: 中央防災会議東南海、南海地震等に関する専門調査会で検討された国内活断層に対する各種地震規模推定式とその評価結果 [3]

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_o 、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 $M_o = \mu S D$ (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。

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

この式に式(1)を適用すると、

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

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³。

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 [dyn·cm/s²]」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。

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

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。

$$M_0 = \frac{16}{7} r^2 R \Delta\sigma_a \text{ (Boatwright 1988) [2]}, \quad (12)$$

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

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。

関西電力は、表 6 のように、「FO-A~FO-B 断層のパラメータ (基本ケース)」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 $\Delta\sigma = 3.0\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 12.7\text{MPa}$ (アスペリティ面積比 $S_a/S = 0.236$) である。

³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。

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 6 での「 $S_a/S = 0.22$ 法」の列のパラメータ値であり、アスペリティ平均応力降下量は $\Delta\sigma_a = 13.7\text{MPa}$ と少し大きくなる。この場合、アスペリティ面積比 S_a/S は A 法でも 0.236 に留まり、 $S_a/S = 0.22$ 法の 0.22 と大差がなく、結果として応力降下量にも大差はない。

しかし、関西電力によるパラメータ値は地震規模を断層面積から M7.2 として求めたものであり、これを断層長さから松田式で M7.4 とした場合には、表 6 のように応力降下量がそれぞれ $\Delta\sigma = 5.3\text{MPa}$ および $\Delta\sigma_a = 24.1\text{MPa}$ と 2 倍近くに跳ね上がる。

高浜原発における FO-A~FO-B 断層の地震動評価で、図 2 および図 3 のように、耐専スペクトルと断層モデルとの間に 2 倍以上の差が見られたのは、このためである。地震規模が半分程度に過小評価された結果、応力降下量が半分程度に過小評価され、地震動が 1/2 以下へ過小評価される結果となったのである。

この関係は、FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合にも明瞭に現われる。表 7 の M7.6 とした場合が関西電力によるパラメータ値であり、松田式で M7.8 とした場合が右端の列の値である。この場合には、地震規模が大きいためいずれも $S_a/S = 0.22$ 法を用いている。関西電力による応力降下量は断層平均で $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ になり、M7.8 とした場合にはそれぞれ $\Delta\sigma = 6.5\text{MPa}$ および $\Delta\sigma_a = 29.4\text{MPa}$ と 2 倍以上に跳ね上がる。その結果、図 8~図 10 のように耐専スペクトルと断層モデルとで 2~3 倍の開きが出たのである。

付言すると、図 2~図 4 および図 8~図 10 では短周期レベル A と応力降下量を 1.5 倍にしたケースも断層モデルで評価しており、一番大きな地震

波になるのがこのケースである。この場合には、応力降下量は $\Delta\sigma = 3.1 \times 1.5 = 4.7\text{MPa}$ および $\Delta\sigma_a = 14.1 \times 1.5 = 21.2\text{MPa}$ になるが、地震規模を M7.8 とした場合からはほど遠い。

さらに付け加えると、関西電力は FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮する際、応力降下量についてだけは断層モデルのレシピで求めず、Fujii-Matsu'ura(2000)[5] の応力降下量を用いている。通常の断層モデルのレシピに従うと、表7の括弧書きのように $\Delta\sigma = 4.0\text{MPa}$ と $\Delta\sigma_a = 18.4\text{MPa}$ 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のである。実は、このことによって関西電力はぼけつを掘っている。これをもう少し詳しく見てみよう。

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 18 の地震データに回帰させて導出した値 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 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 = 30km、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)[10] 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関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。」

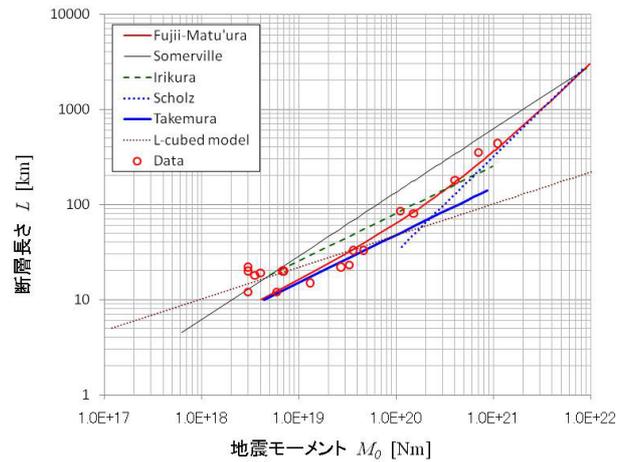


図 18: Fujii-Matsu'ura[5] 等によるスケーリング則の関係：Somerville(細線)、入倉 (Irikura, 緑破線), Scholz(青太点線)、武村 Takemura(青太直線)、L3 乗モデル (茶細点線)、Fujii-Matsu'ura(赤太曲線)。Fujii-Matsu'ura は Takemura と Scholz に漸近し国内地震データ (赤丸) にフィットしている

つまり、 $M_0 - L$ 関係が経験的に式 (15) で表されるということが重要であり、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うのである。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)」報告書の中で「長さ 100km を超えるような長大な断層」と明記しており、「FO-A~FO-B 断層と熊川断層の 63.4km 連動モデル」が「長大な断層」と言えるかどうかは疑問である。断層幅も $W = 14\text{km}$ と狭く、剛性率も $3.5 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ と小さい。したがって、Fujii-Matsu'ura モデルを適用する前に、適用できるかどうかについての慎重な検討が必要であろう。

それはさておき、より大きな問題がモデルそのものにある。Fujii-Matsu'ura[5][25] 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 (断層長さ L と地震規模を表す地震モーメント M_0 の関係式) を「観測データに基づく回帰計算」から求めたものであり、応力降下量 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ はそれに付随して得られた値に過ぎない。しかも、彼らの用いた地震データは図 18 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 18 の青太実線), 長大断層に対しては Scholz の式 (図 18 の青点線) [28] に漸近するように $L-M_0$ 関係式 (図 18 の赤太曲線) を導出している. Fujii-Matsu'ura に依拠するのであれば, 彼らの $L-M_0$ 関係式が断層モデルのレシピで採用されている入倉式とは合わず, むしろ, 松田式や武村式に合うということをはっきり認めるべきである. Fujii-Matsu'ura[5] の地震データが入倉らの北米中心の地震データとは全く異なることを直視し, 国内の断層モデルでは国内の地震データに基づいた断層モデルのパラメータ設定法を採用すべきであることを認め, レシピの妥当性について根本から見直すべきである. 少なくとも推本による修正レシピ, すなわち, 「地震規模を松田式で求め断層面積を修正してレシピを適用する」方法を採用すべきである.

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 [15] 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」[15] 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 [8], 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[17], 新潟中越沖地震 M6.8(2007.7.16) では 3 アスペリティで 23.7MPa, 23.7MPa および 19.8MPa[11], 岩手・宮城内陸地震 M7.2(2009.6.14) では 2 アスペリティで 17.0MPa と 18.5MPa[12] であった. これらを教訓として, アスペ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.

大飯原発では基準地震動を超える地震動評価

関西電力は, 大飯 3・4 号についても同様に, 「FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した」場合の地震動評価を行っている. ただし, 高浜 3・4 号とは異なり, 大飯原発の場合には震源断層との距離が近すぎるため, 耐専スペクトルは「適用範囲外だ」として評価しておらず, 断層モデルによる評価結果だけである. 震源断層のパラメータは表 7 の通りであり, 高浜 3・4 号の場合と変わらず, 震源

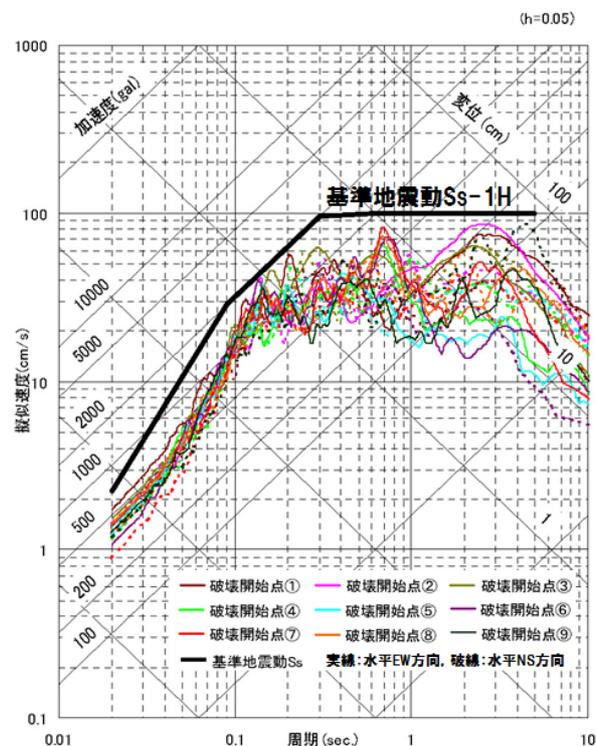


図 19: 大飯原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合の断層モデルによる地震動評価結果 (基本ケース: 水平方向) と基準地震動 Ss-1H(2012.4[19], 2013.7[22], 2013.12[20])

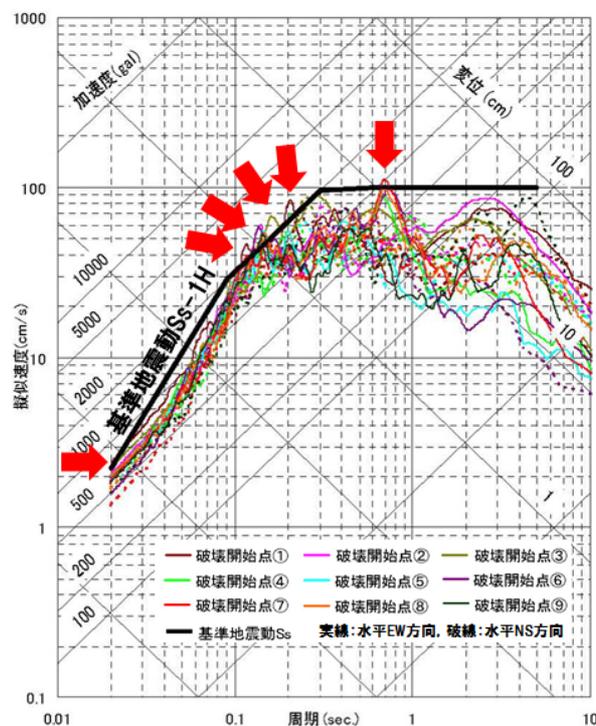


図 20: 大飯原発における FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を考慮した場合の断層モデルによる地震動評価結果 (応力降下量 1.5 倍ケース: 水平方向) と基準地震動 Ss-1H(2012.4[19], 2013.7[22], 2013.12[20])

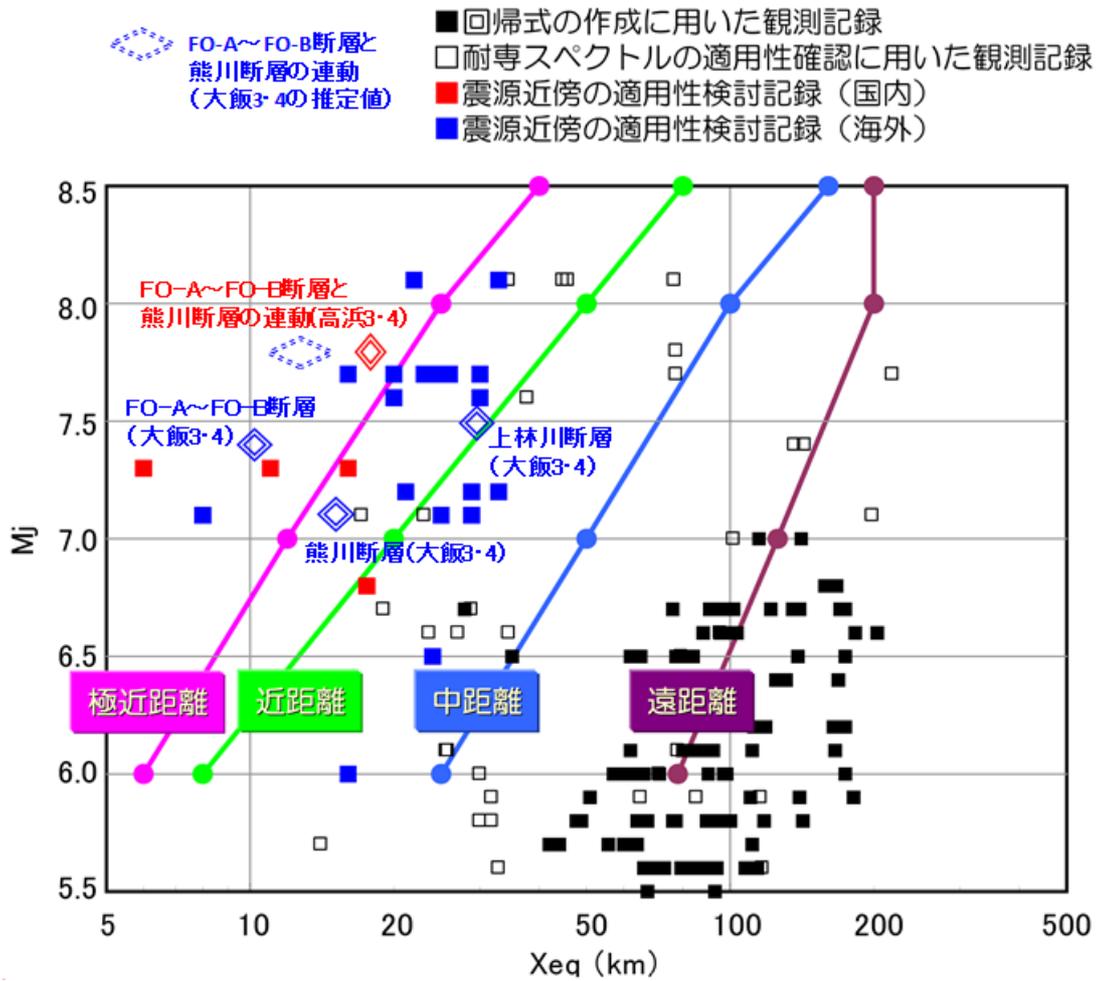


図 21: 耐専スペクトルの作成・適用性確認に用いられた地震データの等価震源距離 X_{eq} と気象庁マグニチュード M (図中は M_j と表記) [34] (大飯 3・4 号と高浜 3・4 号に関するデータを二重線の菱形 [22, 23] および二重点線の菱形 (推定値) で加筆した)

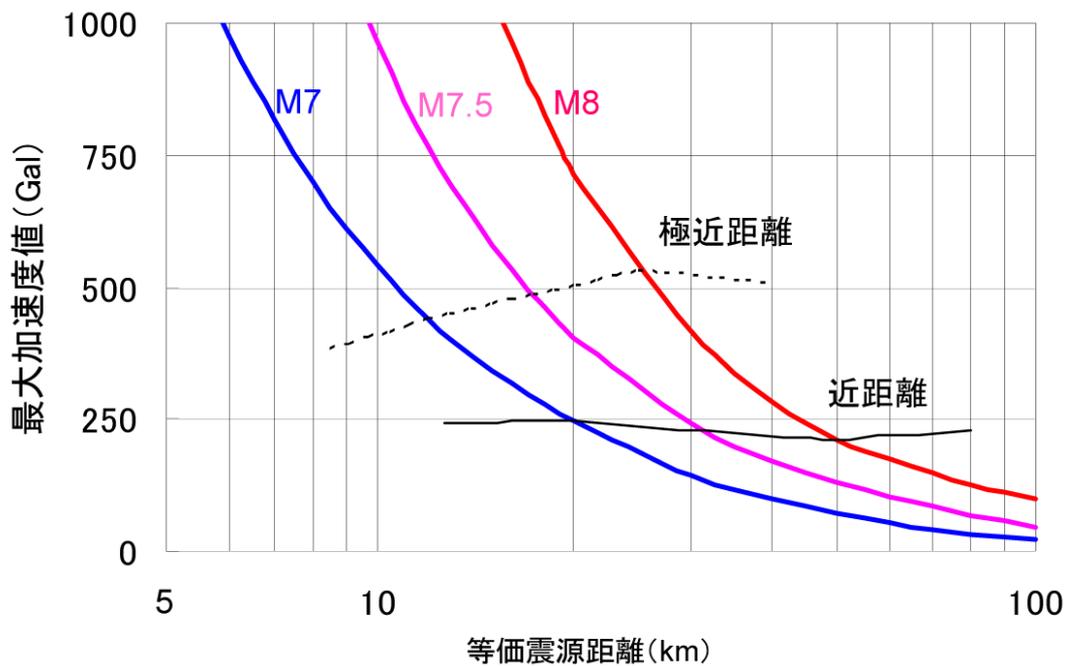


図 22: 耐専スペクトルにおける等価震源距離と地震動の最大加速度 [22]

断層の各メッシュから発生する要素地震波を重ね合わせる場所が違うだけである。表7の基本ケースに対する地震動評価結果は図19の通りであり、基準地震動 Ss-1H を超えない。しかし、応力降下量を1.5倍にしたケース（厳密には短周期レベル A も1.5倍化されている）では、図20のように基準地震動 Ss-1H を矢印の6カ所で超えた。周期0.02secでの応答加速度は地震動の最大加速度に対応するが、この値が759ガルになり、基準地震動 Ss-1H の700ガルを超えており、基準地震動を改定せざるを得ないであろう。

その際に問題になるのが、(a)「適用範囲外」とされた耐専スペクトルによる評価と(b)断層モデルによる地震動過小評価である。まず、(a)について述べるが、図21を見て頂きたい。

関西電力は大飯原発周辺の主な断層のうち、上林川断層 (M7.5, $X_{eq} = 30.2\text{km}$) と熊川断層 (M7.1, $X_{eq} = 15.4\text{km}$) については耐専スペクトルを描いて検討しているが、「FO-A~FO-B断層 (M7.4, $X_{eq} = 10.5\text{km}$)」については「等価震源距離と極近距離の乖離が大きいため、適用範囲外とする」[22]と主張し、耐専スペクトルを求めている。

確かに、図21を見れば、耐専スペクトルの極近距離の線より左側にあり、「乖離」しているように見える。しかし、高浜3・4号については、極近距離の線付近に位置する「FO-A~FO-B断層 (M7.4, $X_{eq} = 18.3\text{km}$:基本, 17.9km:上端3km, 16.4km:傾斜角75度)」や「上林川断層 (M7.5, $X_{eq} = 19.9\text{km}$:基本, 19.5km:上端3km)」は元より、極近距離の線からはずれた位置にある「FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を考慮した場合 (M7.8, $X_{eq} = 18.0\text{km}$:基本)」や等価震源距離がより短い「傾斜角75度ケース (M7.8, $X_{eq} = 16.1\text{km}$ 程度)」についても耐専スペクトルを求めている。その結果、高浜3・4号では図5のように耐専スペクトルが基準地震動を超えたため基準地震動を引き上げざるを得なかった。

にもかかわらず、大飯3・4号では「FO-A~FO-B断層 (M7.4, $X_{eq} = 10.5\text{km}$)」についても、「FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を考慮した場合 (M7.8, $X_{eq} = 12.6\text{km}$ 程度:基本)」についても、耐専スペクトルは適用範囲外だとして耐専

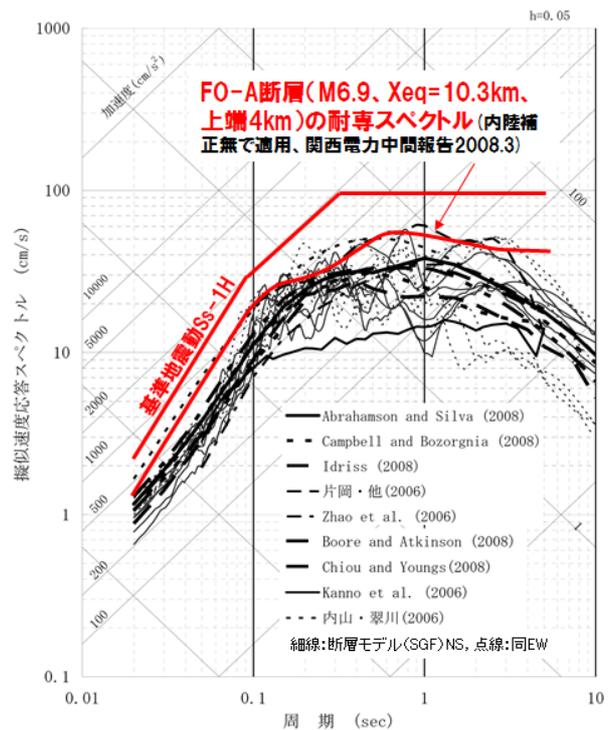


図23: 大飯原発におけるFO-A~FO-B断層の各種距離減衰式による応答スペクトルの評価結果(基本ケース:水平方向)とFO-A断層の耐専スペクトルの対比(2008年3月)[18]

スペクトルを求めている。図21をみれば、これらよりかなり外れた位置にある「適用性検討記録(国内)」,すなわち、鳥取県西部地震による賀正ダム (M7.3, $X_{eq} = 6\text{km}$) の記録もあり、そこでの耐専スペクトルの妥当性は確認されており、「適用範囲外だ」とする理由にはならない。

関西電力がこれらのケースについて耐専スペクトルを適用したくない理由は、「極近距離の線から乖離している」からではなく「地震動が大きくなりすぎる」からである。図22からこれらの耐専スペクトルがどの程度になるかは推測がつく。「FO-A~FO-B断層 (M7.4, $X_{eq} = 10.5\text{km}$)」で約800ガル、「FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を考慮した場合 (M7.8, $X_{eq} = 12.6\text{km}$ 程度:基本)」には1000ガル以上になる。いずれの場合も、最大加速度700ガルの基準地震動 Ss-1H を大きく超える。

ちなみに、関西電力は耐専スペクトルの代わりに距離減衰式による応答スペクトルを求めているが、例えば、FO-A~FO-B断層に対する距離減衰式による地震動評価結果は図23の通りであり、FO-B断層とは切り離して評価されたFO-A断層 (M6.9,

$X_{eq} = 10.3\text{km}$)」の耐専スペクトルと同程度にすぎない。耐専スペクトル以外の距離減衰式による応答スペクトルは明らかに過小評価になっている。「FO-A~FO-B 断層 (M7.4, $X_{eq} = 10.5\text{km}$)」は FO-A 断層より地震規模がかなり大きく⁴, その耐専スペクトルを描けば、前述のように基準地震動を大きく超えるため、「適用範囲外だ」としたのである。

次に、(b)の断層モデルによる過小評価との関係である。先に高浜 3・4 号における地震動評価結果を用いて耐専スペクトルと断層モデルの間に 2 倍程度の差があることを示したが、それを大飯 3・4 号に当てはめると、地震動の最大加速度は 1000 ガルを超えるどころか、759 ガルの 2 倍程度の 1500 ガルにもなる可能性がある。大飯 3・4 号のストレステスト (一次評価) 評価結果で、炉心溶融事故に至る限界の地震動 (クリフエッジ) は、表 1 のように、基準地震動 S_s の 1.80 倍、 $1.80S_s$ (1,260 ガル) であり、これを超える可能性が高いと言える。

以上より、大飯 3・4 号については、耐専スペクトルを適用するか、断層モデルの過小評価を改めるかすれば、地震動評価は最大加速度で 1000 ガルを超え、クリフエッジを超える可能性が高い。つまり、再稼働などもってのほかであり、閉鎖し廃炉にする以外ないのである。

最近の地震観測記録で耐専スペクトルを見直せ

耐専スペクトルが国内の活断層による地震動評価にとって極めて重要であり、基準地震動の是非を左右するものであることは、高浜・大飯原発の例をみても明らかであろう。とくに、等価震源距離が小さいと、図 22 のように地震動の最大加速度が急激に大きくなり、1000 ガルを軽く超える。電力会社はこれに恐怖し、原発の近くに活断層がある場合などでは「適用範囲外だ」として耐専スペクトルを適用せず、他の距離減衰式で応答スペクトルを過小評価してやりすごそうとしている。

⁴FO-A 断層は断層長さ 23.5km から松田式で M7.1 になるが、関西電力は 2008 年中間報告では断層モデルで地震規模を M6.9 と過小算定していた。図 23 の耐専スペクトルは本来であればより大きな「FO-A 断層 (M7.1, $X_{eq} = 10.3\text{km}$)」の耐専スペクトルを描かなければならない。そうすれば、過小評価が一層鮮明になる。

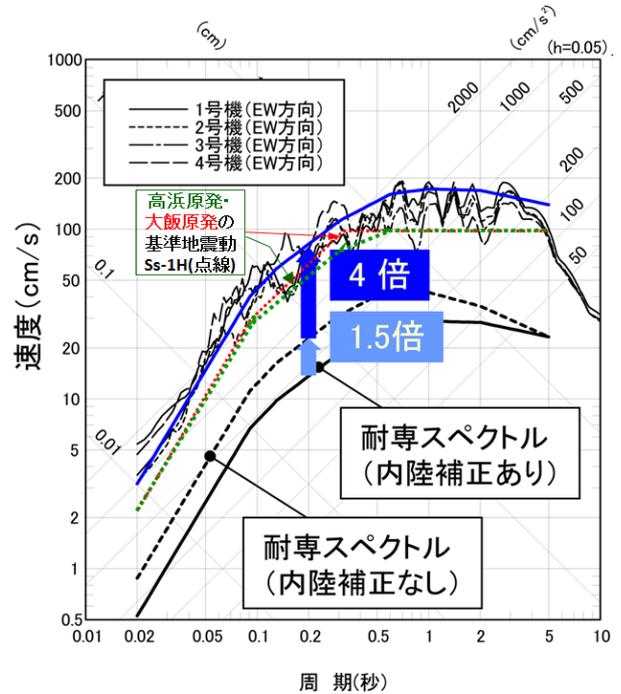


図 24: 柏崎刈羽原発 1~4 号での新潟県中越地震時の解放基盤表面地震動はぎとり波の応答スペクトル (東西 EW 方向) [33] (東電が推定した解放基盤表面地震動 (はぎとり波) の最大加速度 (上図で周期 0.02 秒における応答加速度に対応する) は、1699gal(1 号), 1011(2 号), 1113(3 号), 1478(4 号), 766(5 号), 539(6 号), 613(7 号) である。耐専スペクトルの「内陸補正あり」は海洋プレート間地震のデータ等の混在したデータによる耐専スペクトルを内陸地殻内地震のスペクトルに補正するもので、「内陸補正なし」を約 0.6 倍したものである。)

ところが、1995 年兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) 以降、全国に強震計が設置され、最近約 20 年の間に震源近傍を含めた M7 クラスの地震観測記録がとれている。2007 年新潟県中越沖地震 (M6.8) と 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M7.2) では、地下で 1000 ガルを超える地震動が相次いで観測された。これらを含め、最近の強震観測記録に基づいて耐専スペクトルを作成し直せば、信頼度が増し、適用範囲が格段に広がり、もはや「適用範囲外だ」という言い逃れはできなくなる。

また、耐専スペクトルでは、元になった 44 地震の観測記録の 3/4 はプレート境界地震であり、内陸地殻内地震は 1/4 にすぎないため、内陸地殻内地震では 0.6 倍にするか、サイトでの地震観測記録があればそれで補正することになっている [26]。最近 20 年間の内陸地殻内地震のデータで補えばこのような補正も不要になろう。しかし、関西電力を含めて、耐専スペクトルによる地震動評価では、以下に述べる新潟中越沖地震を教訓として、ほと

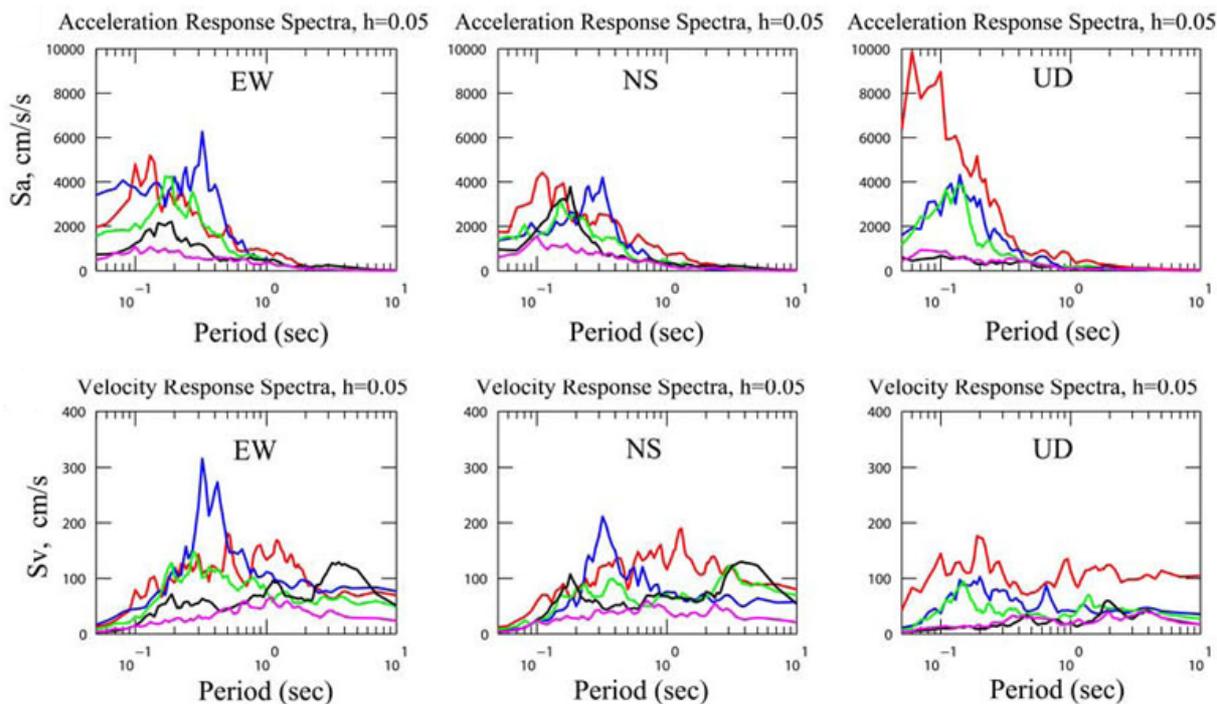


図 25: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地震観測記録（地表）の応答スペクトル [1]
 (赤：一関西 IWTH25, 青：東成瀬 AKTH04, 緑：IWTH26, 黒：MYG004, 紫：ATK023)

んどの場合、このような内陸補正を行っていない⁵。

2007年7月に起きたM6.8の新潟県中越沖地震では、図24のように、柏崎・刈羽原発で1699galという非常に大きな地震動(解放基盤表面はぎとり波)が観測された。大飯3.4号の基準地震動や高浜3.4号の新基準地震動をはるかに超えている。また、同地震を引き起こした沖合活断層の柏崎刈羽原発での耐専スペクトル(内陸補正あり)の約6倍の地震動に相当する。東京電力や独立行政法人原子力安全基盤機構JNESの解析によれば、震源特性の要因で約1.5倍、深部地盤構造の伝播経路特性で約2倍、敷地下の古い褶曲構造などサイト(地盤)特性で約2倍、合計約6倍に増幅されたという[33]。これ以降、震源特性として約1.5倍の不確かさを考慮し、深部地下構造や3次元地盤構造を詳細に調べることが常識となった。そのため、耐専スペクトルでは、内陸補正を行わないことで震源特性の不確かさを考慮することになったのである。これに対応して、断層モデルでも、不確かさの考慮として応力降下量(および短周期レベル)を「1.5倍または20MPaの大きい方」に設定することとし、「特に応力降下量が20MPa以下のサイ

⁵例外的に、四国電力は伊方3号の再稼働に向けた今回の申請で内陸補正を行っている。

表 2: 2008年岩手・宮城内陸地震 M7.2 による強震観測値(加速度 [gal], 速度 [cm/s])

観測点	3成分合成	東西	南北	上下
一関西(地表)	4022 gal	1143	1433	3866
一関西(地下)	1078 gal	1036	748	640
一関西(地表)	100.1cm/s	71.0	61.5	84.7
一関西(地下)	73.2cm/s	42.2	37.2	68.5

トは適切性について再点検が必要」と注意している[6]。

さらに、岩手・宮城内陸地震の震源ごく近傍で逆断層の上盤直上に位置する一関西(いちのせきにし)では最大加速度が地表で4022gal(cm/s^2)、地下で1078gal(いずれも3成分合成)という極めて大きな地震動が観測された[1]。しかも、上下動が極めて大きく、図25のように、地表では3866galで水平動の約3倍、周期0.06秒における加速度応答スペクトルは上下UDで9853galにも達した。入倉ら[12]は、P波速度を1/2以下に小さくして短周期地震波を大きくし、Q値を「劇的に小さく」して振幅を抑え、上下動の非対称性についてランポリン効果等を考えれば、極めて大きな地表地震動の生成メカニズムを一応説明できるとしている。しかし、地下で3成分合成最大加速度は1078galに達し、上下動の最大速度は68.5cm/sで水平動42.2cm/s(EW)

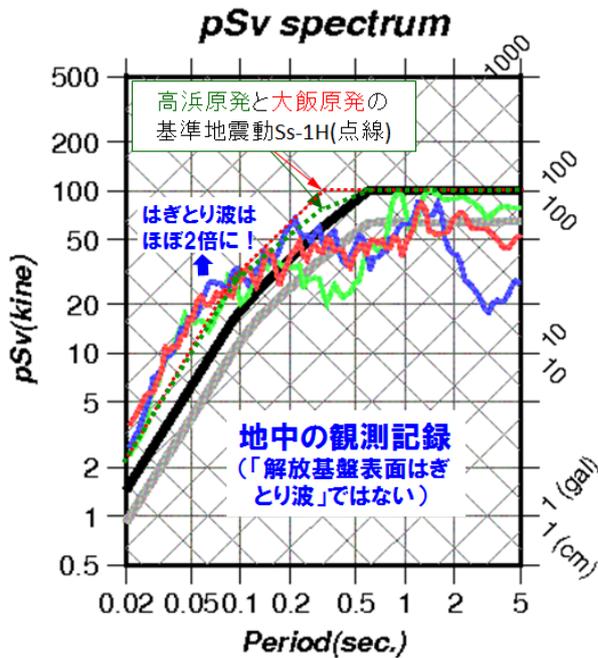


図 26: 岩手・宮城内陸地震 M7.2 で観測された地震観測記録（地下）の応答スペクトル [7] と高浜 3-4 号の新基準地震動および大飯 3-4 号の基準地震動との比較

の 1.5 倍を超えた。この生成原因については不明なままである。一関西の地下地震計は深さ 260m, S 波速度 1810m/s の岩盤に設置されており、表 1 の若狭の原発の解放基盤表面位置のせん断波 (S 波) 速度と同等と言える。地下観測記録の応答スペクトルは図 26 の通りであり、周期 0.1sec 以下の短周期領域では大飯原発の基準地震動および高浜原発の新基準地震動を大きく超えている。この地下地震動を解放基盤表面位置でののはぎとり波に換算すれば、2000 ガル程度へさらに大きくなり、柏崎刈羽原発の 1699gal を確実に超えるであろう。これらの地震動は表 1 に示される若狭の原発のクリフエッジを大きく超えており、このような地震動が実際にこれらの原発を襲うことになれば、炉心溶融事故を避けることはできないであろう。

新潟中越沖地震や岩手・宮城内陸地震をはじめ、これまでに観測され、また、今後観測されるであろう M7.3 以下の地震の解放基盤表面相当位置での地震動（はぎとり波）をすべて「震源を特定せず策定する地震動」に加え、これらに耐えられない原発は閉鎖する必要がある。

さらに、注意すべきは、「倍半分」と言われる地震動のバラツキの扱いである。その例を図 27 に示

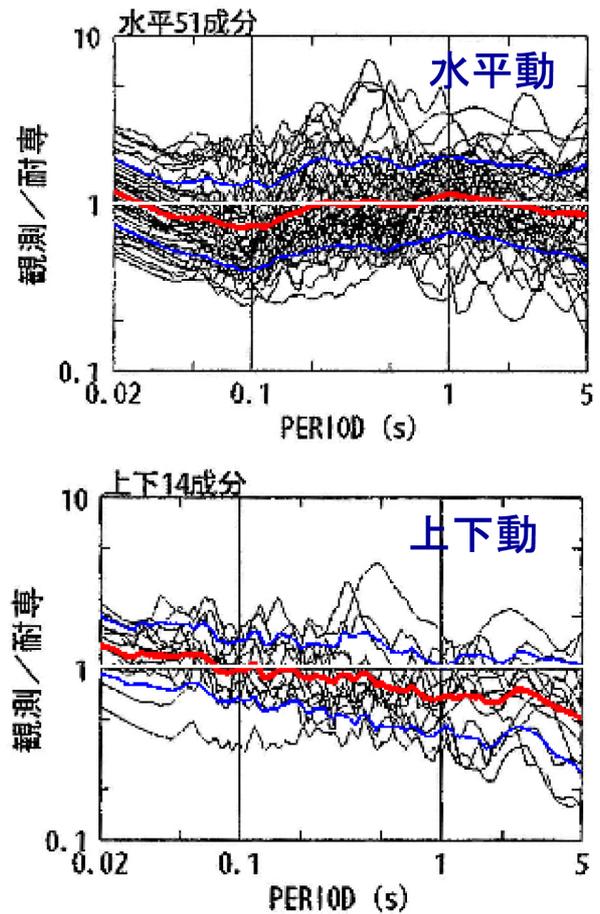


図 27: 国内外の内陸地殻内地震による震源近傍の観測記録 (M6.0~8.1, $X_{eq} = 6 \sim 33\text{km}$, 水平 51 記録, 上下 14 記録) の耐専スペクトル (内陸補正有) との残差 (バラツキ)[34] (細線: 各地震観測記録に対する残差, 太い赤実線: 残差の平均, やや太い青実線: 平均からの「倍半分」の差)

す。これは、東京電力が原子力安全委員会の指示により耐専スペクトルの適用可能性を 2009 年段階で検討したものであり、震源近傍 6~33km の地震観測記録に対する耐専スペクトル (内陸補正有) からの残差を表している [34]。この図より、実際の地震観測値は残差平均より「倍半分」(やや太い青実線の範囲) 以上のバラツキがあり、内陸補正をした耐専スペクトルからも「倍半分」(「観測/耐専」の値で 0.5~2 の範囲) のバラツキがあることがわかる。地震動評価の際には、震源断層の長さや傾斜角の不確かさ、破壊開始点、アスペリティの位置、破碎伝播速度、応力降下量 (震源特性で 1.5 倍) などの不確かさを考慮しているが、これは断層モデル自体の不確かさと断層パラメータの基礎データにおける不確かさを考慮するものであり、

図 27 に示される偶然変動の不確かさを考慮するものではない。耐専スペクトルでは、伝播経路特性や地盤(サイト)特性の観測点による違い(不確かさ)をモデルの中に組み込んでおり、それを一層精緻化することで吸収できる部分も少しは残されているが、偶然変動そのものはモデルのパラメータとしては取り込めない。現状では、図 27 に相当する偶然変動を想定する必要がある⁶。したがって、耐専スペクトルや断層モデルによる地震動評価からさらに「倍半分」の偶然変動が存在することを前提にして基準地震動 S_s を設定し、耐震設計を行う必要がある。

ところが、実際には「倍半分」の余裕をもって策定された基準地震動 S_s など存在しない。この現状に鑑みれば、クリフエッジで $2.0S_s$ 以上、耐震裕度で 2.0 以上でなければ、耐震安全性が確保されているとは言えない。先のストレステスト(一次評価)では、若狭の原発をはじめほとんどの原子力発電所でクリフエッジが $2.0S_s$ には届かなかった。

耐専スペクトルや断層モデルを最近 20 年間の国内地震観測記録で再構築し、地震動評価をやり直せば、クリフエッジが 2.0 以上はおろか、1 未満(すなわち、設計段階で耐震性がない)になる原発も出てくるであろう。少なくとも、大飯 3・4 号と高浜 3・4 号については基準地震動を 1000 ガル以上に引き上げる必要があり、新潟中越沖地震や岩手宮城内陸地震などの地震動を考慮し、地震動の「倍半分」のバラツキを考慮すれば、到底再稼働などできないはずである。

(2014 年 1 月 10 日記)

(注 1) 原発における重要施設の固有周期について

主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期は表 3 に示すとおり、 $0.18\sim 0.47\text{sec}$ である。また、表 4 のように、原子炉格納容器は PWR で 0.214sec 、BWR で 0.444sec と BWR のほうがやや大きい。主要な機器・配管の固有周期は、PWR と BWR で大差はなく、 $0.031\sim 0.144\text{sec}$ である。これより、排気筒など細長い構築物以外は、原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期は、 $0.03\sim 0.5\text{sec}$ の範囲にあり、原子力発電所の耐震性を評価する上では、この短周期側での評価が重要だと言える。

⁶図 27 では国内の内陸地殻内地震のすべてのデータを用いて平均と残差を評価しているが、国内地震データがより多く収集されれば、地震規模や等価震源距離ごとに層別して平均と残差を評価すべきであろう。

表 3: 主な原子力発電所における原子炉建屋の固有周期(水平南北 NS 方向, 東西 EW 方向) [sec]

PWR 原発	NS	EW	BWR 原発	NS	EW
泊 1	0.191	0.226	女川 1	0.244	0.234
泊 2	0.191	0.226	女川 2	0.207	0.203
美浜 1	0.250	0.250	福島第二 1	0.424	0.423
美浜 2	0.240	0.240	福島第二 2	0.458	0.460
美浜 3	0.278	0.280	福島第二 3	0.468	0.473
高浜 1	0.293	0.293	福島第二 4	0.469	0.472
高浜 2	0.293	0.293	柏崎刈羽 1	0.441	0.441
高浜 3	0.226	0.223	柏崎刈羽 2	0.431	0.431
大飯 1	0.185	0.185	柏崎刈羽 3	0.433	0.434
大飯 2	0.185	0.185	柏崎刈羽 4	0.467	0.467
大飯 3	0.212	0.214	柏崎刈羽 5	0.402	0.402
大飯 4	0.214	0.214	柏崎刈羽 6	0.444	0.433
伊方 1	0.236	0.236	柏崎刈羽 7	0.443	0.432
伊方 2	0.184	0.184	浜岡 1	0.250	0.247
伊方 3	0.211	0.193	浜岡 2	0.257	0.256
玄海 1	0.234	0.234	浜岡 3	0.278	0.276
玄海 2	0.265	0.265	浜岡 4	0.279	0.278
玄海 3	0.221	0.230	志賀 1	0.201	0.203
玄海 4	0.214	0.216	島根 1	0.250	0.240
川内 1	0.304	0.304	島根 2	0.229	0.211
川内 2	0.298	0.298	東海第二	0.451	0.452
敦賀 2	0.215	0.216	敦賀 1	0.213	0.213

表 4: 原子力発電所の主要な建屋・構築物および機器・配管類の固有周期の典型例 [sec]

PWR(例)の代表機器名	固有周期
原子炉容器	0.055
使用済燃料ラック	0.042
制御棒駆動装置	0.063
ほう酸タンク	0.078
余熱除去冷却器	0.037
海水ポンプ	0.050
原子炉補機冷却水冷却器	0.041
格納容器スプレイ冷却器	0.037
原子炉格納容器 (PCCV)	0.214
BWR(例)の代表機器名	固有周期
原子炉圧力容器	0.085
使用済燃料貯蔵ラック	0.092
制御棒駆動系水圧制御ユニット	0.043
高圧炉心注水系ポンプ	0.036
残留熱除去系熱交換器	0.032
残留熱除去系ポンプ	0.035
原子炉補機冷却水系熱交換器	0.036
原子炉補機冷却海水ポンプ	0.144
主蒸気逃がし安全弁自動	0.031
減圧機能用アキュムレータ	
可燃性ガス濃度制御系再結合装置	0.049
原子炉格納容器	0.444

大飯・高浜・美浜原発についても、主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期は、表 5 に示すとおりであり、この範囲が重要であることがわかる。ただし、これらの固有周期は原子炉設置許可申請書等に記載された新設時のものであり、設計通りに施工され、腐食・減肉や応力腐食割れなどによるひび割れがないことが前提である。これらの老劣化現象が伴えば、当然、固有周期は変わる。

表 5: 大飯・高浜・美浜原発の主要な建屋・構築物および機器・配管の固有周期 [sec]

対象設備 (項目)	大飯 3-4 号	高浜 3-4 号	美浜 3 号
原子炉容器 (支持構造物)	0.055	0.052	0.065
蒸気発生器 (支持構造物)	0.07	0.063	0.141
炉内構造物 (炉心そう)	0.055	0.052	0.065
一次冷却材管 (本体)	0.07	0.063	0.141
余熱除去ポンプ (基礎ボルト)	≤0.05	≤0.05	≤0.05
余熱除去設備配管 (本体)	0.09	0.082	0.102
原子炉格納容器 (本体)	0.223	0.160	0.179
原子炉建屋 (外周遮蔽建屋)	0.223	0.206	0.273
制御棒クラスタ駆動装置	0.065	0.065	0.218
ガイドチューブ	0.036	0.036	0.065
燃料集合体	0.263	0.323	0.345
制御棒挿入時間 (許容値)	0.55	0.64	0.64

(出典：関西電力株式会社「柏崎刈羽原子力発電所で観測されたデータを基に行う美浜発電所、高浜発電所及び大飯発電所における概略影響検討結果報告書」(2007.9.20))

また、原子力発電所の大型機器や配管類は元々固有周期が長いのだが、サポートを多数設置することで無理矢理短周期にしているため、このサポートが地震動などで破断もしくはサポート機能喪失が起きると、固有周期は長くなる。固有周期が長くなると、地震動による応答 (応答速度や応答加速度等) が大きくなり、一層破壊が進む。ひどい場合にはこの繰り返しが一挙に生じて、カタストロフィックに大破断もしくは大変形を起し、安全機能が失われることになる。

さらに、大きな地震動では建屋・構築物が弾性限界を超えて変形するため「非線形効果」と呼ばれる現象が生じ、床応答スペクトルの特性が変わり、それに伴って施設の応答速度や応答加速度も変わる。

(注 2) 松田式について

松田 (1975)[24] は活断層の長さ L から将来起こりうる地震規模を $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で推定することを提案した。これが「松田式」であり、地震規模は気象庁マグニチュード M で表されている。当初は、この L の値として「地下の震源断層が地表に現れた (地表) 地震断層」や「複数回の断層活動の結果として地震断層が累積されてできた活断層」の長さが用いられ、 $M7$ クラス以下の地震が過小評価される傾向にあった。そのため、松田式は活断層による地震の規模を過小評価するための式だと誤解されてきた。ところが、1995 年兵庫県南部地震では $M7.3$ であったにもかかわらず、淡路島側で短い野島断層が出現しただけで、六甲側では地震断層が出現しなかった。松田式では地表地震断層と地震規模の関係が合わなくなり、松田 (1998) は「新松田式」を示した (松田時彦, 地震, 50, 23 - 33, 1998)。これを巡って、原子力安全委員会ではどちらの松田式を使うのかを検討し、新松田式は使わず、松田式 (1975) を使うこと、ただし、断層長さ L には地表の活断層の長さではなく、地下に広がる震源断層の長さを用いることが確認されたのである。

具体的には、第 166 回原子炉安全専門審査会 (1999.2.10) で、松田式の再評価が行われ、1990 年代後半に収集された国内外の地震データで地下の震源断層の長さ地震規模の関係を見ると松田式 (1975) はよく合っており、新松田式を用いる必要はないことが確認され、第 9 回原子力安全委員会 (1999.2.18) でもそれが了承されている。

第 166 回原子炉安全専門審査会 (1999.2.10) では、小島圭二委員が発言し、「メカニズムとしては世界の陸域の断層に通じるだろうという考え方をしてみますと、世界でも何人かの方が世界中のデータをプロットして、この回帰式を出しております。最近出たものでは、1994 年の D. ウェルスさんと K・カッパーミスさんのお 2 人が世界じゅうの断層、当然日本の断層も全部入れて、地表に表れた断層だけで 77 点ぐらいありますが、これで引いた回帰式は、ほぼ従来の松田式に近いところに来ます。そして、日本特有の問題も入るのかもしれませんが、従来の松田式の方がその線よりもマグニチュードに対して安全側の値を得ているというような検討をしてみました。さらにもう一つ、日本の断層についてはどうだろうということは、1998 年に鹿島の小堀研究室の武村さんがこういう検討を行っています。ただし、彼の場合には、いわゆる地下の断層と申しますか、要するに強震計のデータとか余震記録とか、そういう地震学的ないろいろなものも入れて推定した長さ、したがって、これは地表に出た長さよりは長いわけですが、これも全部入れてマグニチュードの小さいところまでも入れた検討をしている。それである種の考え方を入れると、従来の松田式に近い回帰式が得られるという見解を出しております。そのようなことを入れますと、やはり数を入れて全体像として見てみますと、世界的にも日本の中でも、データの検討の仕方によっては従来の松田式の方がどうも当てはまりそうだという見解の方が多ございまして、私としては、今の世界の回帰式の傾向、それから今回の松田式の入れ方で海域を余り考慮していないというようなことを入れますと、やはり従来の松田式の方が全体像をあらわすのにいいのではないかと考えます。松田先生は、これは大地震の予測、しかも糸魚川-静岡構造線の活断層系の中での大地震の予測という中で、さらりと『こういう整理もしてみました』という表現になっていると思いますので、先ほど部会長からもお話がありましたように、原子力の耐震設計として考えるには、やはり従来の松田式の方が妥当ではないかという見解を持っております。」と述べ、審査会長が「当審査会といたしましては、現段階においては、新しく提案されました松田先生の 98 年の式を採用する必要はないと考えることにしたいと存じます。」と確認している。

この 1 週間後の第 9 回原子力安全委員会臨時会議 (1999.2.18) で、徳山明審査委員が炉安審での議論を次のように紹介している。「これはやはり小島委員が持ってきた例なんですけれども、その後アメリカの人が世界じゅうのいろいろな地震の例で 244 ほどの地震を集めて、それでどれだけの長さを動いたということでやりますと、そこでサブサーフェスエリア、やはり

測地的に言って広い範囲で動いた。この範囲の長さということをはかってやる式が出ておりますが、それと前の1975年の松田さんの式とは、かなりよく一致している。そういうことから考えますと、先ほどから申しますように、あるこの原子炉安全審査という立場で申しますと、どれだけの長さの断層が動いたか。それによって、今後どのくらいの地震が起こり得るかという推定に対しては、以前の75年の式の方が適用性があるのではないかと。そんなふうに私も考えました。」これを受け、当時の佐藤一男原子力安全委員長が、「それでは、このいわゆる新松田の式、これは確かに新しい一つの知見として報告があったものでありますが、これについて現時点でこれによって評価をするというには及ばないと申しますか、そういうふうに審査会の方で専門的にご判断になったと、こういうことのございます。そういうご判断があったということをお安全委員会としては了解するというところでよろしゅうございませうでしょうか。それでは、そのように。」と決定している。

また、原子力安全委員会原子力安全基準専門部会の耐震指針検討分科会地震・地震動ワーキンググループ(第14回, 2004.3.3)でも、原子力安全委員会事務局が、「活断層の長さ L から地震規模 M を求める際に、従来から一般に用いられてきました松田式(1975)について、近年に提案されました他の $M-L$ 関係式との比較検討を行いました。その結果、松田式(1975)は地表変動、余震分布、断層の現地調査、地震学的調査結果などのデータをもとに推定した震源断層面の長さを L に用いている関係式とよく整合することが確認されました。したがって、松田式(1975)は震源断層の長さ L と地震規模との平均的な関係を示すものであるということがいえます。」と報告し、確認されている。このときのグループリーダーは入倉孝次郎である。

参考文献

- [1] 防災科学技術研究所(2008):「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震において記録されたきわめて大きな強震動について」, 「加速度応答スペクトル&速度応答スペクトル($h=5\%$)」
- [2] Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 489-508
- [3] 中央防災会議(2006):第26回「東南海, 南海地震等に関する専門調査会」参考資料, 中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布の検討資料集, 図 2.3.2(2006.12.7)
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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(考え方の整理案), 第7回地震・津波に関する意見聴取会(地震動関係)(2012年8月17日)
- [7] 原子力規制委員会(2013):震源を特定せず策定する地震動について, 原子力規制委員会 発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全設計基準に関する検討チーム第10回会合, 震基 10-3(2013.3.22)
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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の強震動に襲われたのか?- (2007年12月24日修正版)
- [12] 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*
- [13] 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
- [14] 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)
- [15] 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
- [16] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2009):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21年12月21日改訂)
- [17] 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
- [18] 関西電力株式会社(2008):大飯発電所「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(2008.3)
- [19] 関西電力株式会社(2012):大飯発電所 FO-A~FO-B 断層と熊川断層の連動を仮定した地震動評価, 第1回地震津波意見聴取会(地震動関係), 資料 1-4-5(2012.4.23)
- [20] 関西電力株式会社(2013):大飯発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更)(2013.7.8)
- [21] 関西電力株式会社(2013):高浜発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(3号及び4号発電用原子炉施設の変更)(2013.7.8)
- [22] 関西電力株式会社(2013):大飯発電所基準地震動の評価について, 第59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 2-3(2013.12.18)
- [23] 関西電力株式会社(2013):高浜発電所 基準地震動の評価について, 第63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 3-2(2013.12.25)
- [24] 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.
- [25] Matsu'ura M. and Sato T.: "Loading Mechanism and Scaling Relations of Large Interplate Earthquakes," *Tectonophysics*, 227, pp.189-198 (1997)
- [26] Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., Watanabe, T.(2002): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, *OECD Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering*, Istanbul, 399-408(October, 2002)
- [27] 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
- [28] Scholz, C. H.(2002): *The Mechanics of earthquakes and faulting*, second edition, Cambridge University Press
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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
- [32] 武村雅之(1998):日本列島における地殻内地震のスケーリング則—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.
- [33] 東京電力(2008):柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動について, 耐震・構造設計小委員会 第9回地震・津波, 地質・地盤合同ワーキンググループ, 資料合同W 9-1-2, 37(2008.5.22)
- [34] 東京電力(2009):耐震スペクトルの適用性検討(内陸地殻内地震を対象とした追加検討内容), 原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会, 資料第1-2号(2009.5.22)

表 6: 関西電力による「FO-A~FO-B 断層のパラメータ (基本ケース)」 [22]

断層パラメータ	断層モデルで M7.2 とした場合		松田式で M7.4 とした場合		
	A 法 (関電)	$S_a/S = 0.22$ 法	A 法	$S_a/S = 0.22$ 法	
断層長さ L	35.3km (松田式では M7.4 相当)				
断層幅 W	14km				
断層面積 $S = LW$	494.2 km ²				
断層上端深さ	4 km				
断層下端深さ	18 km				
破壊開始点	アスペリティ下端 4 種類 + 断層下端南北 2 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	1.36 × 10 ¹⁹ N·m		2.39 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード	M7.2, M _W 6.7		M7.4, M _W 6.9		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	78.6 cm		138.1 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.50 × 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 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$	3.0 MPa		5.3 MPa		
短周期レベル A	1.26 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		1.53 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$	1.04 sec		1.26 sec		
アスペリティ全体	面積 S_a	117.01 km ²	108.72 km ²	248.19 *1	108.72
	地震モーメント M_{0a}	6.47 × 10 ¹⁸ N·m	6.01 × 10 ¹⁸	2.41 × 10 ¹⁹ *1	1.06 × 10 ¹⁹
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	12.7 MPa	13.7 MPa	10.5	24.1
	平均すべり量 D_a	157.9 cm	157.9 cm	277.5	277.5
アスペリティ大	面積 S_{a1}	78.00 km ²	72.5 km ²	Δ *1	72.5
	地震モーメント M_{0a1}	4.78 × 10 ¹⁸ N·m	4.44 × 10 ¹⁸	Δ *1	7.80 × 10 ¹⁸
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	12.7 MPa	13.7 MPa	Δ *1	24.1
	平均すべり量 D_{a1}	175.0 cm	175.0 cm	Δ *1	307.6
アスペリティ小	面積 S_{a2}	39.00 km ²	36.2 km ²	Δ *1	36.2
	地震モーメント M_{0a2}	1.69 × 10 ¹⁸ N·m	1.57 × 10 ¹⁸	Δ *1	2.76 × 10 ¹⁸
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	12.7 MPa	13.7 MPa	Δ *1	24.1
	平均すべり量 D_{a2}	123.7 cm	123.7 cm	Δ *1	217.5
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	377.19 km ²	385.48 km ²	246.01	385.48
	地震モーメント M_{0b}	7.12 × 10 ¹⁸ N·m	7.58 × 10 ¹⁸	Δ *1	1.33 × 10 ¹⁹
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.7 MPa	2.1	4.8
	平均すべり量 D_b	53.9 cm	56.2 cm	Δ *1	98.7
Q 値	50f ^{1.1}				

注: 「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, 「 $S_a/S = 0.22$ 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 A 法は問題があるため $S_a/S = 0.22$ 法を用いるように推奨している. その際, 推本は「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.

*1: 地震規模を M7.4 にすると, A 法ではアスペリティ面積が 248.19km² (断層面積の 50.2%) となり, 大きすぎる. そのため, 背景領域の地震モーメント M_{0b} と平均すべり量 D_b がマイナスになり, 意味をなさない. このような場合にアスペリティ面積を断層面積の 22% に固定する方法が $S_a/S = 0.22$ 法であり, 応力降下量は 24.1MPa と大きい, 実際に起きている M7 クラスの地震では 20~30MPa の応力降下量が見られるため大きすぎることはない. 関西電力は断層面積から地震規模 M7.2 を求めており, 地震規模が小さくなるため A 法でもアスペリティ面積が 117.01km² (23.7%) に留まっている. この場合には, A 法でも $S_a/S = 0.22$ 法でも結果に大差はないと思われるが, 応力降下量を 1.5 倍化して不確かさを考慮する際には, アスペリティ平均応力降下量は A 法で 19.1MPa, $S_a/S = 0.22$ 法で 20.5MPa と少し差が開く.

表 7: 関西電力による「FO-A~FO-B と熊川断層の連動を考慮した」断層パラメータ (基本ケース) [22]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)		断層モデルで M7.6 とした場合 (関電)			松田式 (M7.8)
		全体	FO-A~FO-B	熊川断層	全体
断層長さ L		63.4 km	36.2 km	27.2 km	63.4 km
断層幅 W		14.0 km			
断層面積 $S = LW$		887.6 km ²	506.8 km ²	380.8 km ²	887.6 km ²
断層上端深さ		4 km			
断層下端深さ		18 km			
破壊開始点		各アスぺリティ下端 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 [N·m]		4.38×10^{19}	2.65×10^{19}	1.73×10^{19}	7.01×10^{19}
マグニチュード		M7.6, M_W 7.0			M7.8, M_W 7.2
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		141.1 cm	149.6 cm	129.7 cm	225.8 cm
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.50×10^{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 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$		3.1 MPa (4.0MPa) *1			6.5 MPa
短周期レベル A [N·m/s ²]		1.87×10^{19}	—	—	2.19×10^{19}
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9}M_0^{1/3}$		1.54 sec	—	—	1.80 sec
アスぺリティ 全体	面積 S_a	195.27 km ²	111.5 km ²	83.78 km ²	195.27 km ²
	地震モーメント M_{0a} [N·m]	1.94×10^{19}	1.17×10^{19}	7.64×10^{18}	3.10×10^{19}
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.1 MPa (18.4MPa) *1			29.4 MPa
	平均すべり量 D_a	283.6 cm	300.8 cm	260.7 cm	454.0 cm
アスぺリティ 大	面積 S_{a1}	—	74.3 km ²	—	—
	地震モーメント M_{0a1} [N·m]	—	8.67×10^{18}	—	—
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	—	14.1 MPa*1	—	—
	平均すべり量 D_{a1}	—	333.3 cm	—	—
アスぺリティ 小	面積 S_{a2}	—	37.2 km ²	—	—
	地震モーメント M_{0a2} [N·m]	—	3.07×10^{18}	—	—
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	—	14.1 MPa*1	—	—
	平均すべり量 D_{a2}	—	235.7 cm	—	—
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	692.33km ²	395.3 km ²	297.02 km ²	692.33 km ²
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	2.44×10^{19}	1.48×10^{19}	9.64×10^{18}	3.91×10^{19}
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.8 MPa (3.7MPa) *1			5.9 MPa
	平均すべり量 D_b	100.9 cm	107.0 cm	92.8 cm	161.5 cm
Q 値		$50f^{1.1}$			

注: 「 $S_a/S = 0.22$ 法」とはアスぺリティ総面積を断層面積の 22% に固定する方法である。関西電力は、「FO-A~FO-B」の 35.3km モデルでは A 方を用い、熊川断層との連動 63.4km モデルでは「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用いるなど使い分けている。表 6 と上表を比べてみれば、応力降下量が小さくなるように使い分けているのが歴然である。

*1: 地震調査研究推進本部 (推本) による断層モデルのレシピによれば、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断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を用い、アスぺ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。問題はどの長さ以上を「長大な断層」とみなすかであるが、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」(同報告書 p.6) と定義しており、63.4km では到底、長大な断層とは言えない。そこで、長大でない断層の場合に用いられるレシピで平均応力降下量を算出して括弧内に記しておいた。通常のレシピによれば、アスぺリティの平均応力降下量は 18.4MPa となり、14.1MPa の 1.3 倍になることがわかる。また、断層長さから松田式で求めた地震規模は M7.8 になり、地震モーメント M_0 で比較すると 1.6 倍になる。その結果、応力降下量も、断層平均 6.5MPa、アスぺリティ平均 29.4MPa と大きくなる。不確かさの考慮では応力降下量を 1.5 倍しているが、14.1 MPa では 21.2MPa に留まるが、地震動評価ではこの地震動が基準地震動を超えている。18.4MPa では 27.6MPa となるから、さらに大きく超えるのは必至であり、29.4MPa とその 1.5 倍化も考慮すれば極めて大きな地震動になろう。