

表 6: 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 7: 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

(注 2) 耐専スペクトルの適用範囲について

2000 年鳥取県西部地震 (M7.3) において, 震源断層のほぼ直上にある賀祥ダム ($X_{eq} = 6\text{km}$) で地震観測記録が取れている. このダムは震源断層に接近しており, 耐専スペクトルの等価震源距離 X_{eq} が極近距離よりかなり小さく, 電力会社の基準によれば「適用範囲外」になるところである. ところが, その地震観測記録は, 図 16 のように, 耐専スペクトル (内陸補正有) によく適合

表 8: 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))

している.

この点については, 2009 年の意見交換会 [41] でも, 原子力安全委員会の釜江克宏耐震安全性評価特別委員会委員は賀祥ダムのデータに基づき, 「そういうところでもまあ使えるというような, それは個別の話だと思えるのですけれども. そういう, これは少し科学的な根拠があると思うのですけれども, そういうものが出来れば, それを我々は受け入れて, それを基に最終的には個別に審査すべきだと思いますので. あの黄色 (引用者注: 適用範囲外の領域) が全くデータがないからだめという話でも私はないような気がする。」と発言し, 入倉孝次郎委員長も同意していた.

(注 3) 断層モデルによる地震動過小評価について

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, 21] 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」 [14, 15] 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[21]が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[30]（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9に「FO-A~FO-B断層(上端深さ3kmの基本ケース)」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 $S = 529.5\text{km}^2$ から次式の下段の式を使って地震モーメント $M_o = 1.56 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ (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9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65%にすぎない。これでは震源断層から65%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)[37]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)[14]の図33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.[38]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[39]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36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」[39]と断じている。

$S - M_o$ 関係を示す図33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36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」[33]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33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 $S - M_o$ 関係式は、最初に図36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

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

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、 $M_o \geq M_{ot}$ (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 $L - M_o$ 関係式(4)は、Shimazaki(1986)[35]が日本列島周辺の地殻内地震の断層長さ L と M_o の関係調べて

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

の関係式を導き、 $M_o < M_{ot}$ では $M_o \propto L^3$ 、 $M_{ot} \leq M_o$ では $M_o \propto L^2$ 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36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 $M - M_o$ 換算式 $M = (1/1.17)(\log_{10} M_o[\text{N}\cdot\text{m}] - 10.72)$ を適用すると、 $\log_{10} L = 0.513 \log_{10} M_o - 11.99$ が得られる。この式は

表 9: FO-A~FO-B 断層のパラメータ (上端深さ 3km の基本ケース) [25, 27, 28]

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		15km			
断層面積 $S = LW$		529.5 km ²			
断層上端深さ		3 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		1.56 × 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 $D = M_0/(\mu S)$		84.2 cm		128.9 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 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$		3.1 MPa		4.8 MPa	
短周期レベル A		1.32 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		1.53 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$		1.09 sec		1.26 sec	
アスペリティ全体	面積 S_a	131.27 km ²	116.49 km ²	231.64 *1	116.49
	地震モーメント M_{0a}	7.77 × 10 ¹⁸ N·m	6.90 × 10 ¹⁸	2.10 × 10 ¹⁹ *1	1.06 × 10 ¹⁹
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9 *1	21.7
	平均すべり量 D_a	169.2 cm	169.2 cm	259.0	259.0
アスペリティ大	面積 S_{a1}	87.51 km ²	77.7 km ²	154.4	77.7
	地震モーメント M_{0a1}	5.74 × 10 ¹⁸ N·m	5.09 × 10 ¹⁸	1.55 × 10 ¹⁹	7.80 × 10 ¹⁸
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1}$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9	21.7
	平均すべり量 D_{a1}	187.5 cm	187.5 cm	287.1	287.1
アスペリティ小	面積 S_{a2}	43.76 km ²	38.8 km ²	77.2	38.8
	地震モーメント M_{0a2}	2.03 × 10 ¹⁸ N·m	1.80 × 10 ¹⁸	5.48 × 10 ¹⁸	2.76 × 10 ¹⁸
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2}$	12.6 MPa	14.2 MPa	10.9	21.7
	平均すべり量 D_{a2}	132.6 cm	132.6 cm	203.0	203.0
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	398.23 km ²	413.01 km ²	297.86	413.01
	地震モーメント M_{0b}	7.82 × 10 ¹⁸ N·m	8.70 × 10 ¹⁸	2.88 × 10 ¹⁸ *1	1.33 × 10 ¹⁹
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	2.8 MPa	2.2	4.3
	平均すべり量 D_b	56.1 cm	60.2 cm	27.6 *1	92.2
Q 値		50 $f^{1.1}$			
高周波限界遮断周波数 f_{max}		8.3Hz			

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ビでは, 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. 関西電力は $S_a/S > 0.30$ で $S_a/S = 0.22$ 法を使う方針だが, 根拠に乏しい.

*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 231.64km² (断層面積の 43.7%) となり, 大きすぎる. そのため, アスペリティ平均応力降下量が 10.9MPa とかなり小さくなり, 背景領域の地震モーメントや平均すべり量も非常に小さい. 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 21.7 MPa と大きめだが, 実際に起きている M7 クラスの地震では 20~30MPa になる例も多いことから妥当と言える.

関西電力は断層面積から地震規模 M7.2 を求めているため, 地震規模が小さく算定されてしまい, 関西電力による A 法ではアスペリティ面積が 131.27km² (24.8%) と比較的大きくなり, アスペリティ平均応力降下量は 12.6MPa に留まる. $S_a/S = 0.22$ 法では 14.2MPa とやや大きくなるが, 断層面積から地震規模を小さく算出しているため, 松田式で M7.4 とした場合の 21.7MPa には届かない.

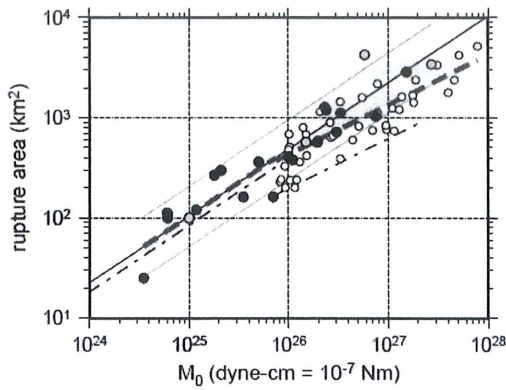


図 33: 断層面積 S (rupture area) と地震モーメント M_0 の関係 [14] (破線がレシビの式に相当, 入倉らは $L = 20\text{km}$ で $W_{max} = 16.6\text{km}$ に達すると仮定し, 分岐点を $M_0 = 7.5 \cdot 10^{25}\text{dyn-cm}$ としている. 一点鎖線は武村 (1998) による $W_{max} = 13\text{km}$ とした関係式で分岐点の M_0 は同じ)

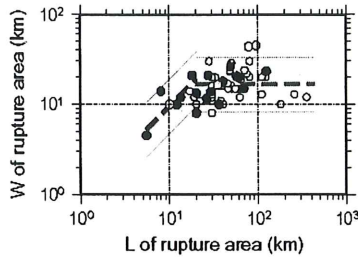


図 34: 入倉ら [14] による $L - W$ の関係 (○は Well et al.(1994)($M_{0t} < M_0$), ●は Somerville et al.(1999) および Miyakoshi(2001), 灰色の○は低角逆断層のデータ)

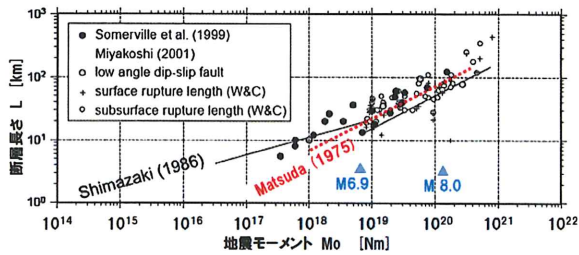


図 35: 断層長さ L (rupture length) と地震モーメント M_0 の関係 [14] (赤点線が松田式)

入倉ら [14] も導いており, 図 35 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)[37] であり, 武村 (1998)[39] 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があるいは日本周辺の地域性によるもの

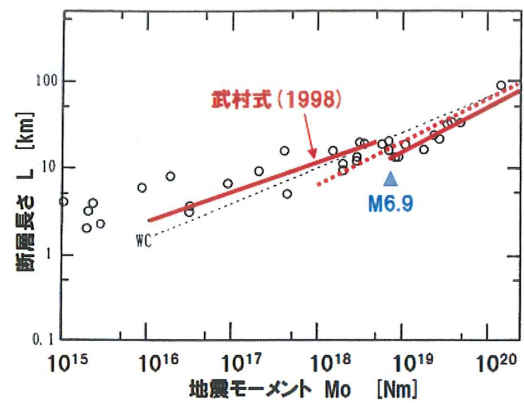


図 36: 武村 [39] による $L - M_0$ の関係 (赤点線が松田式を加筆)

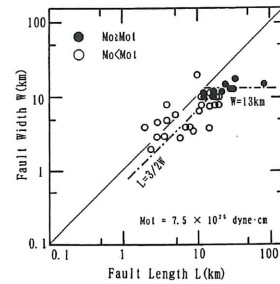


図 37: 武村 [39] による $L - W$ の関係

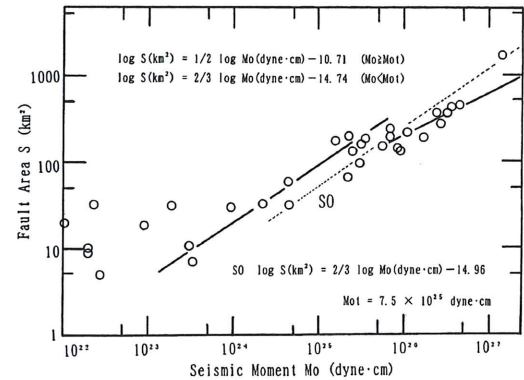


図 38: 武村 [39] による $S - M_0$ の関係

か, 今後の検討が必要とされる。」 [14] と提起している。

Somerville et al.(1993)[37] (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ヴァ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。」 [37]

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、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。最も科学的な方法は、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 39 の結果を得ている [4]。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

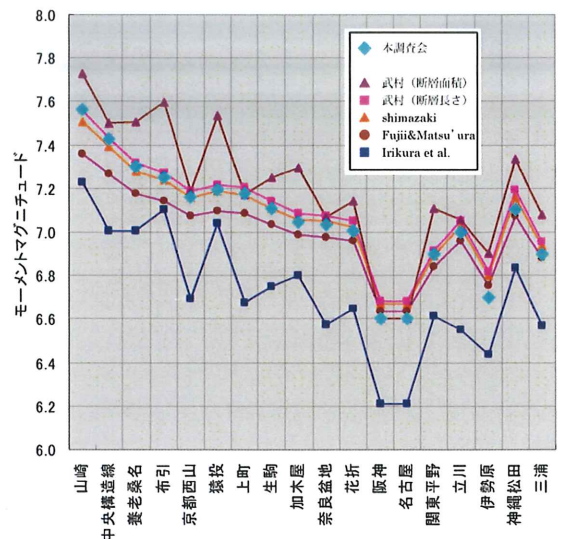


図 39: 中央防災会議東南海、南海地震等に関する専門調査会で検討された国内活断層に対する各種地震規模推定式とその評価結果 [4]

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、 $\log_{10} M_0 = 1.5M_W + 9.1$ 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、

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

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⁴。

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。

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

$$A = 4\pi r \Delta\sigma_a \beta^2 \text{ (壇ほか 2001) [7]}. \quad (13)$$

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9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 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 12.6\text{MPa}$ (アスペリティ面積比 $S_a/S = 0.248$)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

⁴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。

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「 $S_a/S = 0.22$ 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 $\Delta\sigma_a = 14.2\text{MPa}$ 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0.248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9のように応力降下量がそれぞれ $\Delta\sigma = 4.8\text{MPa}$ および $\Delta\sigma_a = 21.7\text{MPa}$ と1.7倍に跳ね上がる。

高浜原発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一つは、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、FO-A～FO-B～熊川断層の場合にも現われる。表4のM7.7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づれも $S_a/S = 0.22$ 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 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ および $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ と2倍近くへ跳ね上がる。その結果、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。

付言すると、断層モデルでは、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～熊川断層の場合には、応力降下量については断層モデルのレシピで求めず、Fujii-Matsu'ura(2000)[8]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4の括弧書きのように $\Delta\sigma = 4.2\text{MPa}$ と $\Delta\sigma_a = 19.0\text{MPa}$ 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墓穴を掘っている。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40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

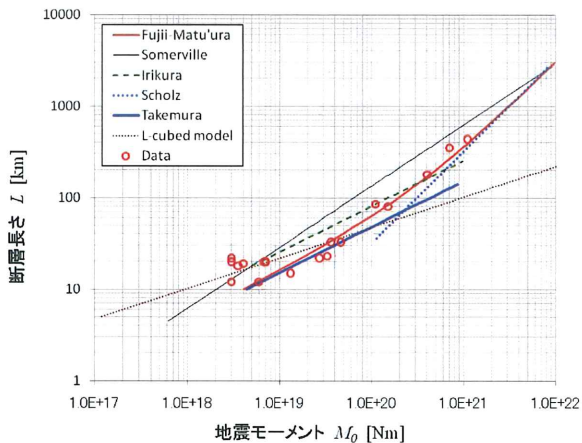


図 40: Fujii-Matsu'ura[8] 等によるスケーリング則の関係: Somerville(細線), 入倉 (Irikura, 緑破線), Scholz(青太点線), 武村 Takemura(青太直線), L3 乗モデル (茶細点線), Fujii-Matsu'ura(赤太曲線). Fujii-Matsu'ura は Takemura と Scholz に漸近し国内地震データ (赤丸) にフィットしている

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)[15] 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うことである。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 [22] の中で「長さが100 kmを超えるような長大な断層」(p.6)と明記しており、「FO-A~FO-B~熊川断層 63.4km」は「長大な断層」とは言えない。断層幅は $W = 15\text{km}$ だが、剛性率は $3.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ と小さい。したがって、Fujii-Matsu'ura モデルを適用する前に、応力降下量に関する国内地震データとの整合性を十分検討し、国内の地震動評価にその

まま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[8][31] 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40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40の青太実線)、長大断層に対しては Scholz の式 (図40の青点線) [34] に漸近するように $L - M_0$ 関係式 (図40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[8] 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 [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 [13], 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[16], 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[17] 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。

(注4) 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] 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 [5] 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レ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。ただし、修正レシピ

はあくまで松田式に基づく地震調査研究推進本部による活断層評価との不整合に対する場当たりの辻褃合わせにすぎず、本来なら日本国内の地震データに基づいて断層モデルのレシピを根本的に大改定する必要がある。したがって、修正レシピはそれまでのつなぎとしての意義しか持ち得ない。

○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、計算上のものということです。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イケない。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イケないということで、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。

(注5) 松田式について

松田(1975)[30]は活断層の長さ L (今日では「活断層の下に広がる震源断層の長さ」とされている)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。もちろん、これは震源断層の長さから推定される地震規模の平均像であり、図35および図36のように、国内外の地震データに対して大きなバラツキを伴う。

この松田式は国内地震学界で広く用いられており、地震調査研究推進本部の地震調査委員会長期評価部会が2010年に活断層の長期評価手法 報告書(暫定版)[22]を公表し、「3.4.5 活動時の地震の規模」(p.98)において、次のように明示している。

「①地震の規模は、気象庁マグニチュード(M ; 以下では単に「マグニチュード」と記す)で表す。②マグニチュードの大きさは0.1単位で表記する。③活断層の長さに基づき地震の規模を推定する場合には、松田(1975)のM-L式を用いてマグニチュードを計算する。④地震規模の推定の際の断層の長さには地下の断層の長さを用いることとする。⑤過去における1回のずれの量が求められている場合には、松田(1975)のM-D式からマグニチュードを計算する。⑥活断層の長さについて信頼度が低い場合には、M-L式とM-D式を併用する。⑦歴史地震の研究や観測によって地震の規模が分かっている場合には、その値を引用もしくは参照して、上記の手法により求めた地震の規模と包括して記述する。⑧活動時の地震規模について、④、⑤、⑦により複数の値が得られた場合には、最も大きな値を評価に用いる。この際、地表に活断層が表れている場合は地震発生層の厚さに対応する規模以上の地震が発生すると想定されることを考慮する。⑨地下の断層の位置及び長さについて、複数の可能性が想定される場合、シナリオ毎に地震の規模を評価するとともに、ロジックツリーを用いてシナリオの重み付けを行う。」

今の断層モデルのレシピで用いられている入倉式では、上記の松田式による地震規模と比べて、多くの場合、国内の地震規模が半分以下へ過小算定され、地震動が過小評価されている。この矛盾を放置したまま、原発の地震動を過小評価し続けて良いのであろうか。島

崎邦彦氏の問題提起 [36] はこのことを問うているのである。

(注 6) 断層モデルにおける偶然変動の考慮について

断層モデルでは最終的に地震波が得られるため、地震波の中に「偶然変動によるバラツキ」も考慮されていると錯覚しがちである。しかし、震源パラメータの平均像から震源特性や伝播経路特性などの地域性を「不確かさの考慮」として検討したとしても、それは依然として偶然性のバラツキを考慮したことにはならない。断層モデルでは要素地震を観測点で重ね合わせて地震波を合成しており、この要素地震そのものに偶然変動のバラツキがあるからである。経験的グリーン関数法では、検討用地震の震源断層またはその周辺で発生した M5 程度の小規模地震について原発サイトで観測した地震波を要素地震として用いるが、検討用地震のアスペリティ応力降下量と当該地震の応力降下量との比で地震波の大きさを調整している。本来なら、こうして得た要素地震波のバラツキを検討し、保守的に要素地震波を設定する必要がある。しかし、要素地震の数が少ない場合には、川内原発の耐専スペクトル評価における 2 倍の偶然変動を考慮して要素地震波を 2 倍に上げるのも一つの方法であろう。

高浜・大飯原発のように要素地震が全く取れていない場合にも、同様の考え方で、統計的グリーン関数法で生成した要素地震波を少なくとも 2 倍にするなどにより偶然変動のバラツキを考慮すべきである。

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] (財) 地域地盤環境研究所 (2011): 震源を特定せず策定する地震動に関する計算業務報告書 (2011.3)
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinkojo/pdf/ukeoi_1.pdf
- [4] 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)
- [5] 中国電力 (2010): 島根原子力発電所基準地震動 Ss 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)
- [6] 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)
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2005): 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書 (平成 16 年度), JNES/SAE05-00405 解部報-0004(2005.6)
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000005757.pdf>
- [10] 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)
- [11] 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・津波に関す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)
- [12] 北海道電力 (2015): 泊発電所 震源を特定せず策定する地震動について (コメント回答), 第 210 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 (2015.3.20)
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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)
- [17] 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*
- [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 (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)
- [22] 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)
- [23] 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男 (2004): 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル-地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討-, *日本地震工学会論文集*, 第 4 巻, 第 4 号, 46-86
- [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 (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)
- [26] 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)
- [27] 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)
- [28] 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)
- [29] 九州電力 (2013): 川内原子力発電所第 1・2 号機の設置変更許可申請書, 添付書類六 (2013.7.8)
- [30] 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.
- [31] Matsu'ura M. and Sato T.: "Loading Mechanism and Scaling Relations of Large Interplate Earthquakes," *Tectonophysics*, 227, pp.189-198 (1997)
- [32] 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)
- [33] 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
- [34] Scholz, C. H.(2002): *The Mechanics of earthquakes and faulting*, second edition, Cambridge University Press

- [35] 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.
- [36] 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>
- [37] 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.
- [38] 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
- [39] 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.
- [40] 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)
- [41] 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)
- [42] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 31 号大飯原発 3, 4 号機及び高浜原発 3, 4 号機運転差止仮処分命令申立事件」決定, 主文および要旨 (2015.4.14)
- [43] 鹿児島地方裁判所民事第 3 部 (前田郁勝裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 36 号川内原発稼働等差止仮処分申立事件」決定, 主文および要旨 (2015.4.22)
- [44] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 24 年 (ワ) 第 394 号, 平成 25 年 (ワ) 第 63 号大飯原発 3, 4 号機運転差止請求事件」判決, 主文および要旨 (2014.5.21)
- [45] 長沢啓行 (2006): 新しい「耐震設計審査指針 (案)」は, 「自然の摂理」に耐えられるか?, 若狭ネット第 98 号, 8-23(2006.5.24) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-3.pdf>, <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-4.pdf>, <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/98/98-5.pdf>
- [46] 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>
- [47] 長沢啓行 (2015): 川内 1・2 号の耐震安全性は保証されていない, 若狭ネット第 149 号, 6-31(2014/5/11) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/149.pdf> (菊地・山中 (1997) 論文の地震モーメントについて 5/23) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/explain20140522.pdf>
- [48] 長沢啓行 (2015): 1000 ガル超の「震源を特定せず策定する地震動」がなぜ採用されないのか, 若狭ネット第 150 号, 9-35(2014/7/12) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/150.pdf>
- [49] 若狭ネット編集局 (2014): 「川内 1.2 号の審査書案を受けた地震動評価等に関する 2014 年 7 月 29 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/nrc20140801.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/record20140729.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/summary20140729.pdf>
- [50] 若狭ネット編集局 (2015): 「川内・高浜・大飯原発の基準地震動と川内原発の火山に関する 2015 年 1 月 16 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/nrc20150123.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116rec.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20150116summary.pdf>

著者略歴

1975 年大阪大学工学部機械工学科 (蒸気工学) 卒業
 1977 年大阪大学大学院工学研究科 博士前期課程
 産業機械工学専攻 (生産システム工学) 修了
 1977 年大阪府立大学工学部経営工学科助手
 1986 年同講師
 1988 年同助教授
 1995 年同教授 (生産管理システム)
 2001 年大阪府立大学評議員 (3.5 年)
 2001 年大阪府立大学学長補佐 (1 年)
 2009 年大阪府立工業高等専門学校長
 2011 年公立大学法人大阪府立大学理事 (高専担当)
 兼大阪府立大学工業高等専門学校長
 社団法人日本経営工学会理事 (2000~05)・
 監事 (2005~09)
 社団法人日本経営工学会学会賞 (2008)・
 学会貢献賞 (2010)
 大阪府立大学名誉教授 (2009)
 大阪府立大学工業高等専門学校名誉教授 (2013)
 京都大学工学博士 (1985)