

最新の知見を考慮した地震動評価

高橋利昌	四国電力	建設部
大野裕記	四国電力	建設部
佐伯武俊	四国電力	建設部
松崎伸一	四電技術コンサルタント	土木技術部

A prediction of strong ground motion based on the latest knowledge

The group of sea area faults that it is equivalent to the Median Tectonic Line active fault system exists in the Iyo-nada Sea, northwest Shikoku. Then, the earthquake that could be generated at these faults is dominant for the design basic earthquake ground motion of Ikata power plant, Shikoku Electric Power Co., Inc.. As for the application for permission of establishment of a nuclear power reactor, Ikata power plant (reactor No.3), in 1984, we determined the design basic earthquake ground motion, so that it exceeds strong ground motion that caused by these faults.

After that, different new results of investigation and knowledge were announced, which is about the evaluation of the activities of these faults and the prediction technique of strong ground motion. Then, they were partly different from the evaluation that went before. Therefore, based on this latest knowledge, we reevaluated strong ground motion that generated on Ikata power plant by these sea area faults. Then, an amendment about one of the design basic earthquake ground motion was necessary. But it confirmed that seismic safety of the plant facilities was secured.

1. はじめに

四国電力(株)では、伊方発電所前面に広がる伊予灘海域について、1号炉安全審査時の1972年、2号炉申請時の1974～1975年に音波探査を実施し、さらに3号炉申請時の1982～1983年にも、より広い範囲で多種の音波探査による活断層調査を実施している(大野ほか、1997)。そして、中央構造線(以下MTLと記す)活断層系に相当すると考えられる活断層群の存在を確認し、伊方発電所の耐震設計を行う上での基準地震動作成に反映した(四国電力(株)、1984)。敷地の前面海域に存在する断層群は、敷地からの最短距離が約8kmと比較的接近していることから、当該断層群に想定される地震は、伊方発電所の基準地震動にとって支配的となっている。1984年の伊方発電所(3号炉)原子炉設置変更許可申請(以下3号炉申請と記す)においては、敷地が比較的断層近傍に位置することから、当該断層群による地震動を従来の点震源モデルによる距離減衰式(例えば金井式; Kanai & Suzuki, 1968)ではなく、断層モデル解析により評価することとし、小林・翠川の手法[経験的手法、小林・翠川(1981)]、入倉の手法[経験的グリーン関数法、村松・入倉(1981)]、佐藤の手法[理論的手法、佐藤

(1984)]を用いて地震動評価を行った。その結果、小林・翠川の手法による評価が最も厳しい地震動を与える結果となり、これを包絡するように基準地震動S2を設定した。

3号炉申請の後、20年近くが経過しようとしているが、この間、精細な活断層調査が実施されるとともに、強震動分野での研究が精力的に進められてきた。そうした研究の成果として、MTLの活動性に関する評価や強震動予測手法に関して、従来3号炉申請時に行った評価とは異なる、新たな調査結果や知見がいくつか公表されている。四国電力(株)においては、その都度、自主保安の観点から、地震動評価を行い施設の耐震安全性の確認を行ってきた。本報告では、まず1984年の3号炉申請時の評価について概説した後、1997年および2001年に実施した地震動評価(耐震安全性確認)の概要について報告する。

なお、近年盛んに研究が進められている強震動予測手法である経験的グリーン関数法(Dan et al., 1990)による評価については、1997年評価の際に実施し、その内容はFukushima et al. (2001)にまとめたので、本報告における記述は、3号炉申請時の地震動評価において最も厳しい結果を与える結果となった小林・翠

川の手法による評価を中心とする。

2. 伊方発電所(3号炉)原子炉設置変更許可申請
(1984年)

2.1 敷地前面海域の断層群の評価

(1) 断層分布

音波探査の結果、伊予灘においてはF-1～F-20の断層が確認された。そして、断層の連続性、断層の存在位置(陸上MTL活断層系との位置関係・連続性)、断層の形態的特徴、活動時期から、海域西部の断層群、敷地前面海域の断層群(断層長さ46km)、東部海域の断層群に区分した(図1)。

(2) 最新活動時期

敷地前面海域の断層群については、A層(沖積層)に変位を与えていないことから、1万年前以降の活動性が認められないと評価し、基準地震動S2対象とした。

(3) セグメンテーション

当該断層群は、46kmの範囲に断続的かつ雁行状に分布する。地震動評価上はこの区間が一連として活動するものと評価したが、基準地震動S2対象であることから、工学的見地からの検討を加え、想定される最大の地震動を抽出することを目的として、46kmの範囲において断層長さを各種変えて感度解析を実施した。

2.2 断層パラメータ設定

1984年の評価においては、断層長ささと地震規模やすべり量の関係式である松田式(松田、1975)

$$\log L = 0.6 M_m - 2.9 \quad (1)$$

$$\log D = 0.6 M_m - 4.0 \quad (2)$$

L;断層長さ [km]

M_m;松田のマグニチュード(気象庁マグニチュードに相当すると考えられている)

D;すべり量 [m]

を基本とする設定手法を採用した。その概要を図2に示す。また、設定した断層パラメータを表1にまとめる。

2.3 評価結果

敷地前面海域の断層群による地震動を断層モデル解析により評価した結果、前述した3手法のうち、小林・翠川の手法が短周期側で最も厳しい地震動を導き出した。そして、断層長さについての感度解析を実施した結果、断層端から破壊が始まり敷地をわずかに過

ぎたところで破壊が終了する25kmモデル(図3)が敷地において最大の短周期地震動を与える結果となった。

そして、この25kmモデルの解析結果を包絡するように最大加速度473Galの基準地震動S2を設定した(図4)。図4は伊方発電所(3号炉)原子炉設置変更許可申請書(四国電力(株)、1984)の抜粋であるが、敷地前面海域の断層群による地震動は、最も厳しい評価結果である小林・翠川の手法による25kmモデルの結果を代表して記載した。

3. 1997年の耐震安全性確認

3.1 新しい調査結果

1990年から高知大学岡村教授等によって、伊予灘において音波探査が実施され、1996年には断層の最新活動時期などの評価に、一部、四国電力(株)が1984年に行った評価と異なった調査結果が公表された(岡村、1996)。岡村教授等の調査結果と四国電力(株)の評価の主な相違点は表2に示す通りである。

四国電力(株)においては、1997年に自主保安の観点から敷地前面海域の断層群の再評価を行い、耐震安全性確認を実施した。以下にはその概要を記述する。

表1 断層パラメータ(1984年評価)

断層諸元	記号	単位	断層パラメータ
断層長さ	L	km	25.0
断層幅	W	km	12.5
断層面積	S	km ²	312.5
地震モーメント	M ₀	dyne・cm	2.63×10 ²⁶
佐藤のマグニチュード	M _{sa}	—	6.8
モーメントマグニチュード	M _w	—	6.9
平均すべり量	D	m	2.1
断層傾斜角	δ	度	90
断層上端深さ	H	km	2
破壊伝播速度	V _R	km/s	2.5
立ち上がり時間	τ	sec	2.1
基盤のS波速度	V _s	km/s	3.5
剛性率	μ	dyne/cm ²	4.0×10 ¹¹
破壊伝播様式	—	—	一方向伝播
破壊開始位置	—	—	北東端

注;M_wは地震動算出には用いていないが、参考までに表記する

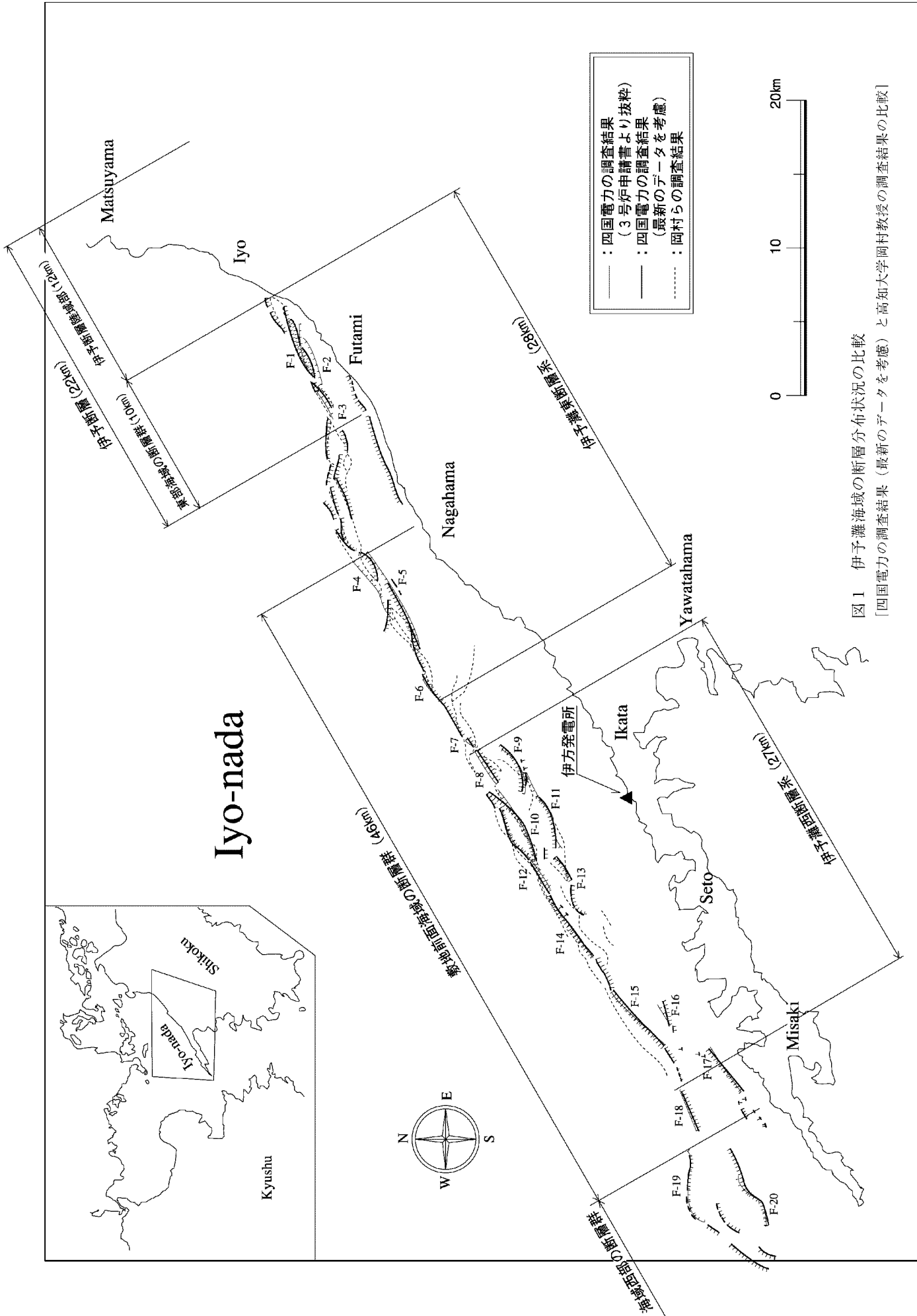


図1 伊予灘海域の断層分布状況の比較
 [四国電力の調査結果(最新のデータを考慮)と高知大学岡村教授の調査結果の比較]

3. 2 敷地前面海域の断層群の評価

(1) 断層分布

活断層の分布位置については、四国電力(株)で再評価を行った結果は1984年評価とほとんど相違はない。また、岡村教授等と四国電力(株)の再評価の間でもほとんど相違はない(図1)。

(2) 最新活動時期

四国電力(株)で岡村教授等の調査結果も含めて再解析を行った結果、少なくとも1万年前以降の断層活動が認められることが確かめられたため、自主保安の観点から安全評価上は当該断層群を基準地震動S1対象とみなすこととした。

(3) セグメンテーション

岡村教授等の見解と相違があるが、断層の連続性、

断層の存在位置、断層の形態的特徴、活動時期、深部地質構造を考慮して再評価した結果、1984年の評価同様、46kmを一連のセグメントとするのが妥当と評価された(大野ほか、1997)ため、これを基準地震動S1対象とした。

一方、基準地震動S2対象としては、1984年の評価において、46kmの断層分布範囲の中で感度解析を実施し、敷地に及ぼす地震動が最大となるケースを抽出した。したがってこれを上回るケースは考えがたいが、岡村教授等の指摘も踏まえ、工学的見地から各種の長さ(11、25、27、46、55、77km)を設定した(図3)。

表2 活断層評価の主な相違点

項目	1984年四国電力 評価	1996年岡村教授等評価
最新活動時期	1万年前以前	1万年前以降
活動度	-	A級
セグメンテーション	海域西部の断層群 敷地前面海域の断層群(L=46) 東部海域の断層群(L=10)	伊予灘西断層系(L=27) 伊予灘東断層系(L=28)

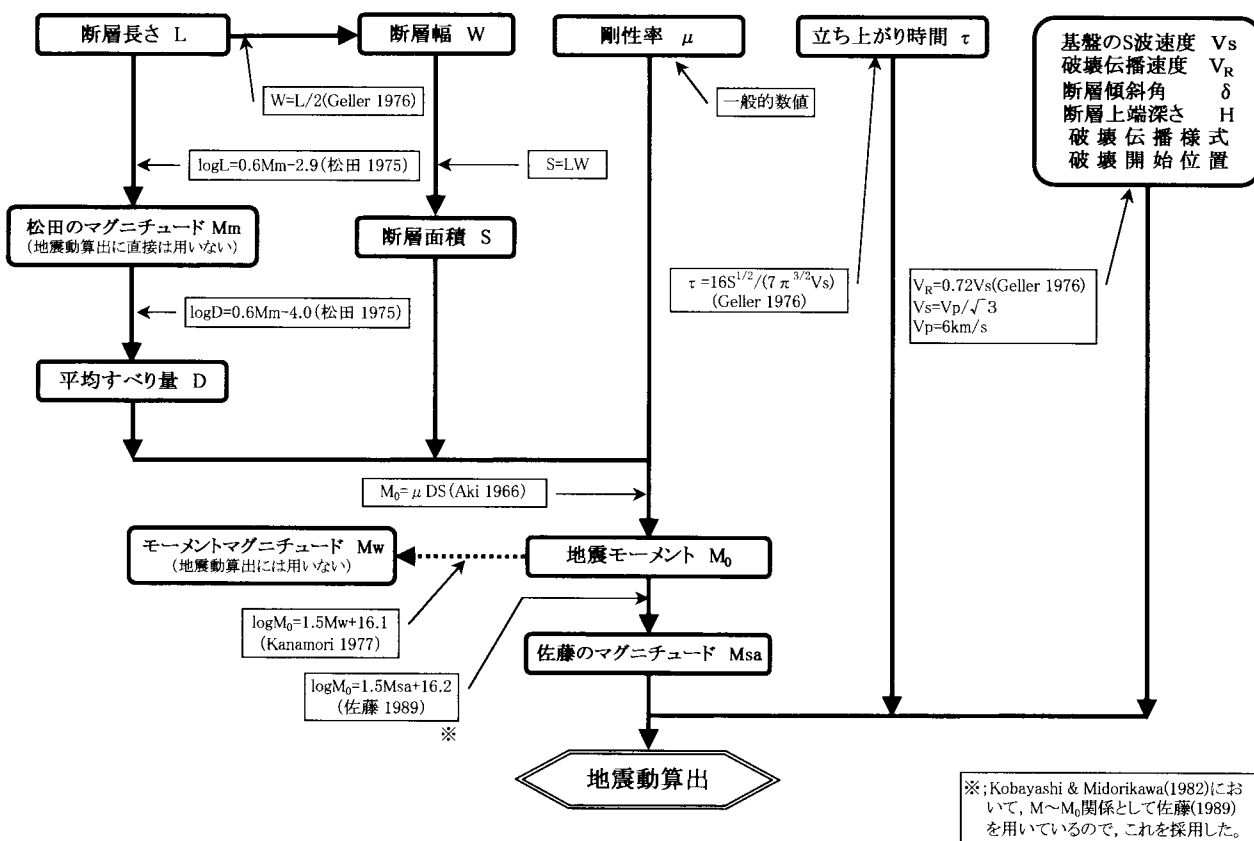


図2 断層パラメータ設定方法(1984年評価)

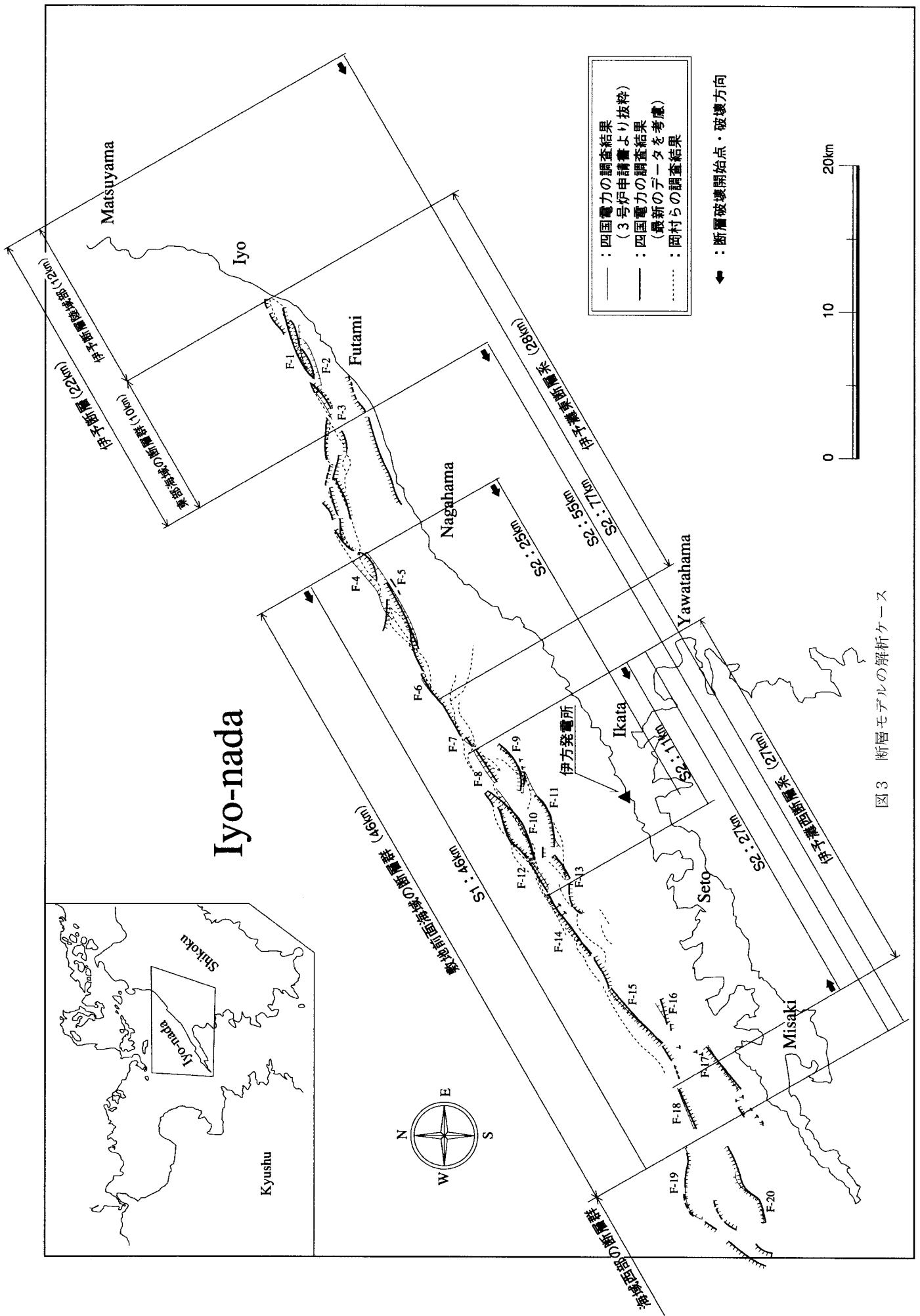


図3 断層モデルの解析ケース

3.3 断層パラメータ設定

1997年の評価においては、1984年の設定思想を踏襲することとし、松田式を基本とする設定手法を採用した。設定方法は図2とほぼ同じであるが、断層幅は地殻厚さ相当の30 kmを上限とした。パラメータ設定値を表3に示す。

3.4 評価結果

解析の結果、46 kmモデルによる地震動は、1984年に設定した基準地震動S1（最大加速度221 Gal）を上回る結果となった。そこで、新たに350 Galの基準地震動S1を設定した（図5）。

基準地震動S2対象とした11、25、27、46、55、77 kmモデルについては、1984年に設定した最大加速度473 Galの基準地震動S2を上回るものはないことを確認した（図6）。

そして、新たに設定した350 Galの基準地震動S1で、伊方発電所第1、2、3号機の各設備の耐震安全性確認を行い、建物・構築物、機器・配管類の応答値が許容値以内であることを確認した。

以上のように、四国電力(株)においては、岡村教授等の見解を一部踏まえても伊方発電所の耐震安全性は確保されることを確認した。そして、この結果については、通商産業省（現経済産業省）資源エネルギー庁において審議を受け、1997年11月には原子力安全委員会に報告されている（資源エネルギー庁、1997）。

なお、近年における強震動予測においては、経験的グリーン関数法に関する研究が盛んに行われているが、1997年評価においては、経験的グリーン関数法

による評価も実施している（資源エネルギー庁、1997）。その結果、前掲した断層群による地震動が350 Galの基準地震動S1および473 Galの基準地震動S2に包絡されることを確認している。この検討については、Fukushima et al.（2001）に詳述している。

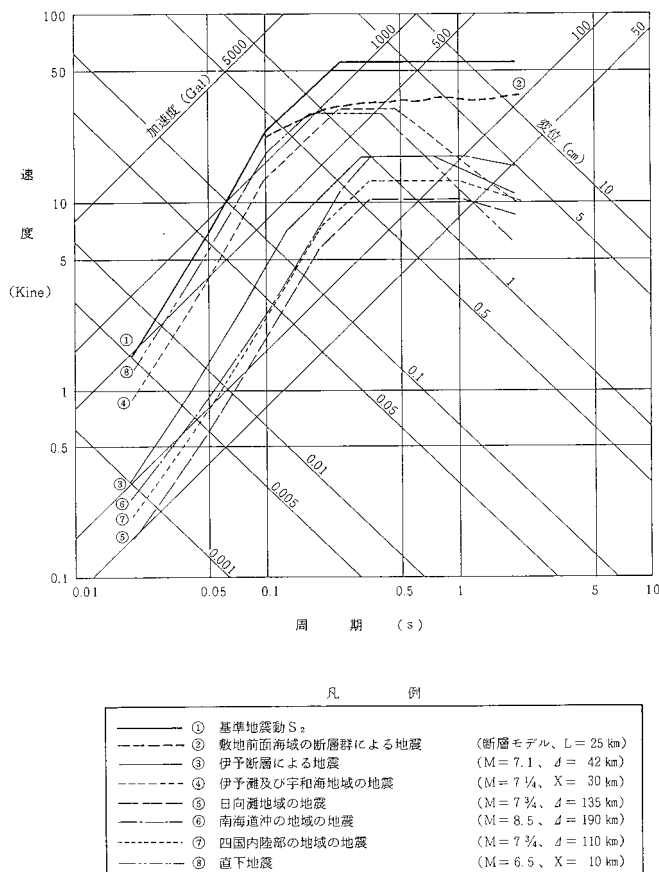


図4 地震動評価結果（1984年評価）
[四国電力(株)（1984）より引用]

表3 断層パラメータ（1997年評価）

断層諸元	記号	単位	断層パラメータ					
			11.0	25.0	27.0	46.0	55.0	77.0
断層長さ	L	km	11.0	25.0	27.0	46.0	55.0	77.0
断層幅	W	km	5.5	12.5	13.5	23.0	27.5	30.0
断層面積	S	km ²	60.5	312.5	364.5	1,058.0	1,512.5	2,310.0
地震モーメント	M ₀	dyne・cm	2.18×10 ²⁵	2.63×10 ²⁶	3.06×10 ²⁶	1.52×10 ²⁷	2.54×10 ²⁷	5.82×10 ²⁷
佐藤のマグニチュード	M _{sa}	—	6.1	6.8	6.9	7.3	7.5	7.7
モーメントマグニチュード	M _w	—	6.2	6.9	6.9	7.4	7.5	7.8
平均すべり量	D	m	0.9	2.1	2.1	3.6	4.2	6.3
断層傾斜角	δ	度	90	90	90	90	90	90
断層上端深さ	H	km	2	2	2	2	2	2
破壊伝播速度	V _R	km/s	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
立ち上がり時間	τ	sec	0.9	2.1	2.2	3.8	4.6	5.6
基盤のS波速度	V _s	km/s	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
剛性率	μ	dyne/cm ²	4.0×10 ¹¹	4.0×10 ¹¹	4.0×10 ¹¹	4.0×10 ¹¹	4.0×10 ¹¹	4.0×10 ¹¹
破壊伝播様式	—	—	一方向伝播	一方向伝播	一方向伝播	一方向伝播	一方向伝播	一方向伝播
破壊開始位置	—	—	北東端	北東端	南西端	北東端	北東端	北東端

注；M_wは地震動算出には用いていないが、参考までに表記する

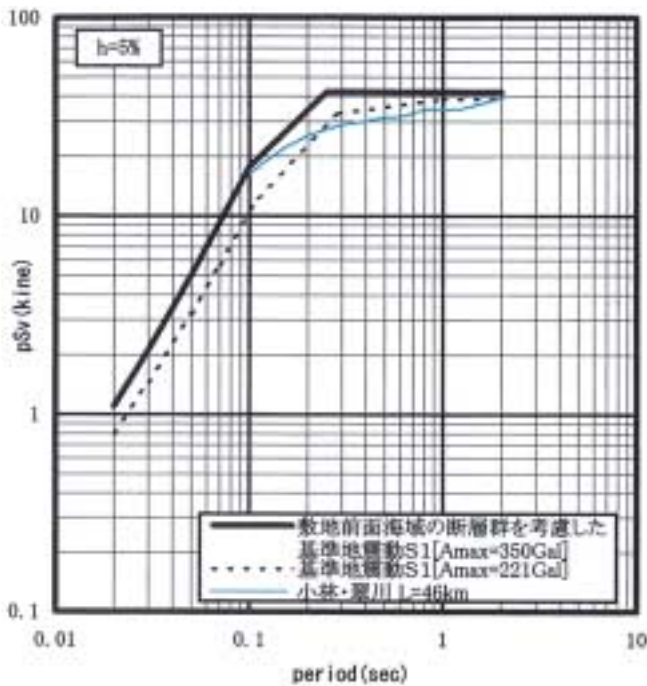


図5 地震動評価結果 S1 (1997年評価)

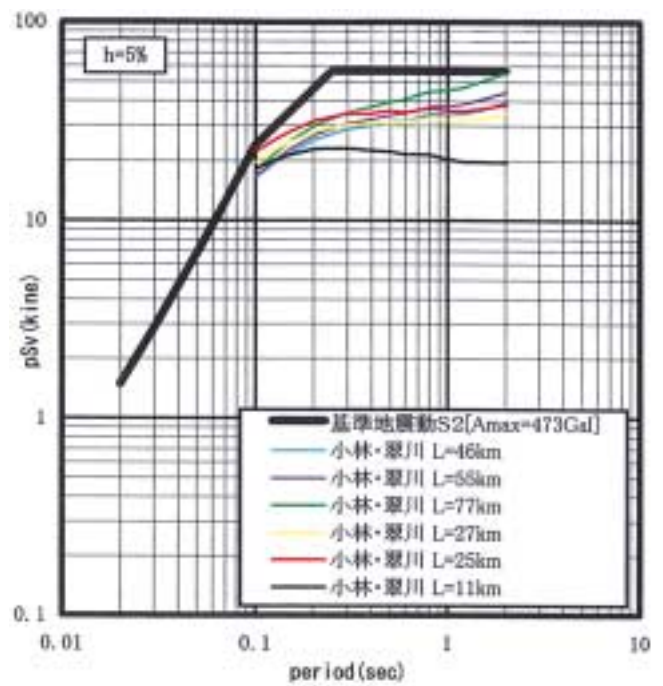


図6 地震動評価結果 S2 (1997年評価)

4. 2001年の耐震安全性確認

4.1 新しい知見

従来の強震動予測は、松田式に代表されるように、断層長さや変位量からマグニチュードを推定し、これを金井式に代表される距離減衰式に適用して、敷地の最大加速度や最大速度を算定するものであった。しかし、地表断層の動きのみから断層運動全体の特性化は困難であり、地震記録等から断層運動を推定する地震学のアプローチとの関係が重要となる(入倉ほか、2001)。この、地震学のアプローチとして、断層モデルを用いた強震動記録のシミュレーションに関する研究が盛んに行われている。震源断層に適当なすべり分布と破壊伝播を想定して求められる強震動と観測波形を比較することにより、大地震の破壊過程を求める研究は、強震動記録や遠地地震記録を用いて断層面でのすべり分布を求める、波形インバージョン解析へと発展した。この震源インバージョンの研究は1980年代の後半から盛んに行われるようになり、観測網の充実と相まって、断層パラメータに関する資料が次第に蓄積されてきた。

Somerville et al. (1999) は、このようにして蓄積されてきた断層パラメータを統計分析し、断層パラメータ間のスケール則を提案した。この中では、地震モーメントと断層面積の関係式を

$$S = 2.23 \times 10^{-15} M_0^{2/3} \quad (3)$$

S; 断層面積 [km²]

M₀; 地震モーメント [dyne·cm]

と提案している。

入倉ほか(2001)は、このSomerville et al. (1999)の関係式などを用いて、強震動予測の方法論(いわゆる入倉レシピ)を提案した。これは震源断層を断層パラメータのスケール則にしたがって特性化するものであり、震源パラメータを、巨視的断層パラメータ(例: 想定される地震の震源断層の位置、長さ、幅、傾斜、深さ、走向、地震モーメント)、微視的断層パラメータ(例: 想定される地震のアスペリティの位置・大きさ・数、アスペリティ・背景領域の平均すべり量・応力降下量、すべり速度時間関数およびf_{max})、その他の震源特性(破壊開始点、破壊伝播様式)の3つに分け、それぞれのパラメータを与える手続きを以下のように示している。

(1) 巨視的断層パラメータ

・長さL;

同時に活動する可能性の高いセグメントの長さの総計とする。

・幅W;

微小地震の震源分布から推定する。それが得られないときは、地殻のP波・S波速度構造を参考に設定する。ただし、断層長さが地震発生層の厚さよりも短い場合にはW=Lとする。

・地震モーメントM₀;

Somerville et al. (1999)の提案する(3)式から算出する。ただし、(3)式は適用限界があ

ると考えられるため、モーメントマグニチュード M_w が 7.5 を超えるような巨大地震を想定するときは、(4)式 (入倉・三宅、2001) などを補助的に考慮する。

$$S = 4.59 \times 10^{-11} M_0^{1/2} \quad (4)$$

(2) 微視的断層パラメータ

- ・アスペリティの面積 S_a 、 S_l ；
アスペリティ面積の総和 S_a および最大アスペリティの面積 S_l は(5)式および(6)式であらわせる。

$$S_a = 0.22 \times S \quad (5)$$

$$S_l = 0.16 \times S \quad (6)$$

S_a ；アスペリティ面積の総和 [km²]

S_l ；最大アスペリティの面積 [km²]

S ；全破壊域の面積 [km²]

- ・アスペリティの個数；
セグメント毎に1個または2個のアスペリティを設置するが、そのどちらを採用すべきかの決め手はいまのところない。
- ・アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ ；
アスペリティの数に応じて次の通りとする。

$$\text{単一}； \Delta\sigma_a = 9.64 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\text{複数}； \Delta\sigma_a = 12.6 \text{ MPa} \quad (8)$$

- ・アスペリティモデルの背景領域の応力降下量；
 $\Delta\sigma_b$

円形クラックの式を準用した(9)式から定める。

$$\Delta\sigma_b = 2.436 \times M_0 b / S b^3 / 2 \quad (9)$$

$\Delta\sigma_b$ ；背景領域の応力降下量

[dyne/cm² = 10⁻⁶ bar]

$M_0 b$ ；背景領域の地震モーメント

[dyne·cm]

$S b$ ；背景領域の面積 [cm²]

- ・アスペリティの位置；
地表の断層変位が大きいところ、または敷地に影響が大きいところに設定する。

(3) その他の震源断層パラメータ

- ・破壊開始点；
地震発生層の下限で、それが急激に変化するところに設定する。
- ・破壊伝播様式；
震源からの円状伝播とする。

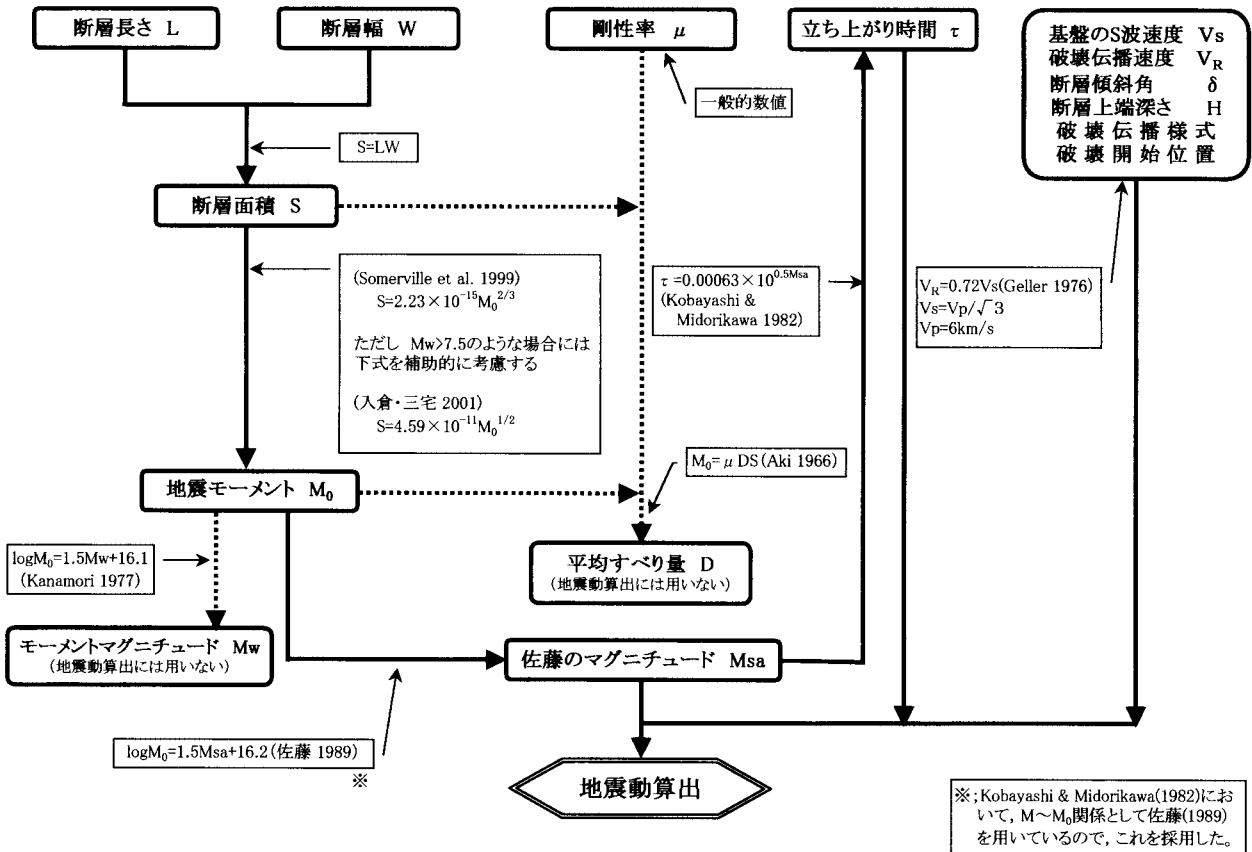


図7 断層パラメータ設定方法 (2001年評価)

4. 2 敷地前面海域の断層群の評価

本知見は、強震動予測手法に関する知見であり、MTLの活断層評価に関するものではない。このため、活断層評価に関しては、1997年の評価を踏襲することとした。ただし、セグメンテーションとしては、1997年の結果を考慮して、

S 1 対象；46 km

S 2 対象；25 km (短周期側で支配的)

46 km

77 km (長周期側で支配的)

を想定した。

4. 3 断層パラメータ設定

本検討における断層パラメータ設定方法を図7に記す。また、設定したパラメータを表4にまとめる。1984年の評価から設定方法を変更した断層パラメータについては、以下に記述する。

(1) 地震モーメント M_0

1984年評価においては、松田式を基本としており、断層長さ L からすべり量 D を算定し、別途設定した剛性率 μ および断層面積 S と合わせて、これらを $M_0 = \mu DS$ の関係式 (Aki, 1966) に代入して M_0 を設定した。

入倉レシピにおいて M_0 の設定は、(3)式を基本と

表4 断層パラメータ (2001年評価)

断層諸元	記号	単位	断層パラメータ					
			Somerville et al. (1999)			入倉・三宅(2001)		
			25.0	46.0	77.0	25.0	46.0	77.0
断層長さ	L	km	25.0	46.0	77.0	25.0	46.0	77.0
断層幅	W	km	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
断層面積	S	km ²	450.0	828.0	1,386.0	450.0	828.0	1,386.0
地震モーメント	M_0	dyne·cm	9.06×10^{25}	2.26×10^{26}	4.90×10^{26}	9.61×10^{25}	3.25×10^{26}	9.12×10^{26}
佐藤のマグニチュード	Msa	—	6.5	6.8	7.0	6.5	6.9	7.2
モーメントマグニチュード	Mw	—	6.6	6.8	7.1	6.6	6.9	7.2
平均すべり量	D	m	0.50	0.68	0.88	0.53	0.98	1.65
断層傾斜角	δ	度	90	90	90	90	90	90
断層上端深さ	H	km	2	2	2	2	2	2
破壊伝播速度	V_R	km/s	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
立ち上がり時間	τ	sec	1.1	1.6	2.0	1.1	1.8	2.5
基盤のS波速度	V_s	km/s	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
剛性率	μ	dyne/cm ²	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}
破壊伝播様式	—	—	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播
破壊開始位置	—	—	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部

断層諸元	記号	単位	断層パラメータ					
			Somerville et al. (1999) -1σ			Somerville et al. (1999) $+1\sigma$		
			25.0	46.0	77.0	25.0	46.0	77.0
断層長さ	L	km	25.0	46.0	77.0	25.0	46.0	77.0
断層幅	W	km	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
断層面積	S	km ²	450.0	828.0	1,386.0	450.0	828.0	1,386.0
地震モーメント	M_0	dyne·cm	4.71×10^{25}	1.18×10^{26}	2.55×10^{26}	1.75×10^{26}	4.36×10^{26}	9.44×10^{26}
佐藤のマグニチュード	Msa	—	6.3	6.6	6.8	6.7	7.0	7.2
モーメントマグニチュード	Mw	—	6.4	6.6	6.9	6.8	7.0	7.2
平均すべり量	D	m	0.26	0.36	0.46	0.97	1.32	1.70
断層傾斜角	δ	度	90	90	90	90	90	90
断層上端深さ	H	km	2	2	2	2	2	2
破壊伝播速度	V_R	km/s	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
立ち上がり時間	τ	sec	0.9	1.3	1.6	1.4	2.0	2.5
基盤のS波速度	V_s	km/s	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
剛性率	μ	dyne/cm ²	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}	4.0×10^{11}
破壊伝播様式	—	—	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播	放射状伝播
破壊開始位置	—	—	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部	北東端最深部

注；Mw, μ , Dは地震動算出には用いていないが、参考までに表記する

し、 M_w が7.5を超えるような場合には(4)式を補助的に用いることとしている。ここで、(3)式から求まる M_0 をKanamori (1977)の M_w 定義式に代入すると、25、46、77 kmモデルの M_w は、それぞれ、6.6、6.8、7.1と求まる(表4)。したがって入倉レシピに従えば、どのモデルも(3)式により検討を行えばよい。しかしながら、入倉・三宅(2001)においてデータ回帰上(4)式の適用範囲は M_0 で 7.6×10^{25} dyne·cm (M_w 6.52)以上とされている。25、46、77 kmモデルとも M_w 6.52以上であることから、参考までに(4)式による検討も行うこととした。さらに、断層パラメータのスケージング則導出に用いた元データにはある程度のばらつきがあることも考慮し、Somerville et al. (1999)の示す標準偏差も考慮して評価した。

(2) 断層幅 W

1984年評価においては、Geller (1976)の関係式

$$W = L/2 \quad (10)$$

W ; 断層幅 [km]

L ; 断層長さ [km]

を用いていたが、入倉レシピにしたがい、P波速度構造(図8 ; Kodaira et al., 2000)から上部地殻(厚さ18 km)を地震発生層と設定した。

(3) 立ち上がり時間 τ

1984年評価においては、Geller (1976)の関係式

$$\tau = 16 \times S^{1/2} / (7 \pi^{3/2} V_s) \quad (11)$$

τ ; 立ち上がり時間 [sec]

S ; 断層面積 [km²]

V_s ; S波速度 [km/s]

を採用した。しかし、Kobayashi & Midorikawa (1982)が、 τ とマグニチュード M の関係式

$$\tau = 0.00063 \times 10^{0.5M} \quad (12)$$

を提案しているため、小林・翠川の手法との整合性を考慮し、(12)式を採用することとした。

(4) 破壊開始点・破壊伝播様式

1984年評価においては、断層端からの一方向伝播(unilateral)としたが、入倉レシピにしたがい、断層下端からの放射状伝播(radial)とした。

図12には断層長さを各種変えた場合の地震動を比較して表してみた。これによると、断層長さを変えても地震動のレベルや傾向は大きく変化するものではないことがわかる。こうした傾向は、経験的グリーン関数法による評価においても確認されている(図13)。

入倉レシピでは、アスペリティモデルを考慮した経験的グリーン関数法による強震動予測を提案しているが、これについては、1997年の評価の際に46 kmモデルに適用し、350 Galの基準地震動 S_1 に包絡されることを確認している(図14 ; Fukushima et al., 2001、Dan & Sato, 1998)。この評価は、入倉レシピが公表される以前に実施したものであり、入倉レシピに完全に準拠したものではない。しかしながら、京都大学入倉教授の指導を受けながら実施したものであるため、同様の思想にのっとった評価であると考えられる。詳細には両者の間には表5に示すような差異があるが、これを概観すると、① M_w はどちらも6.9であること、②アスペリティの応力降下量は入倉レシピの方がやや大きいものの、アスペリティの地震モーメントは1997年評価の方がやや大きいこと、③1997年評価ではアスペリティの位置を最も厳しくなるように敷地直前に設定していること、④破壊伝播様式・破壊開始位置は1997年評価と入倉レシピとで同じであることなどから、全体的には同程度の評価となっており、さらには入倉レシピの示す設定値が平均的なものであり、ばらつきを考慮すれば、概ね現在の入倉レシピに準拠していると言えよう。そして、一様な破壊を仮定した一様モデルと不均質破壊を仮定したアスペリティモデルとの間においても、前述したとおり断層長さを変えても地震動レベルはあまりかわらなかったのと同様に、地震動レベルが大きくは変わらない結果となっている(図14)。

なお、経験的グリーン関数法による検討内容をまとめたFukushima et al. (2001)については、国際的に厳正な査読を受け、複数の専門家からパラメータ設定の妥当性が認められたものであることを付け加えておく。

4. 4 評価結果

評価結果を図9～11に示す。基準地震動 S_1 対象である46 kmモデルでは、いずれの設定方法においても、350 Galの基準地震動 S_1 のスペクトルを下回っている。基準地震動 S_2 対象である25、46、77 kmモデルについては、いずれも基準地震動 S_2 のスペクトルを下回っている。

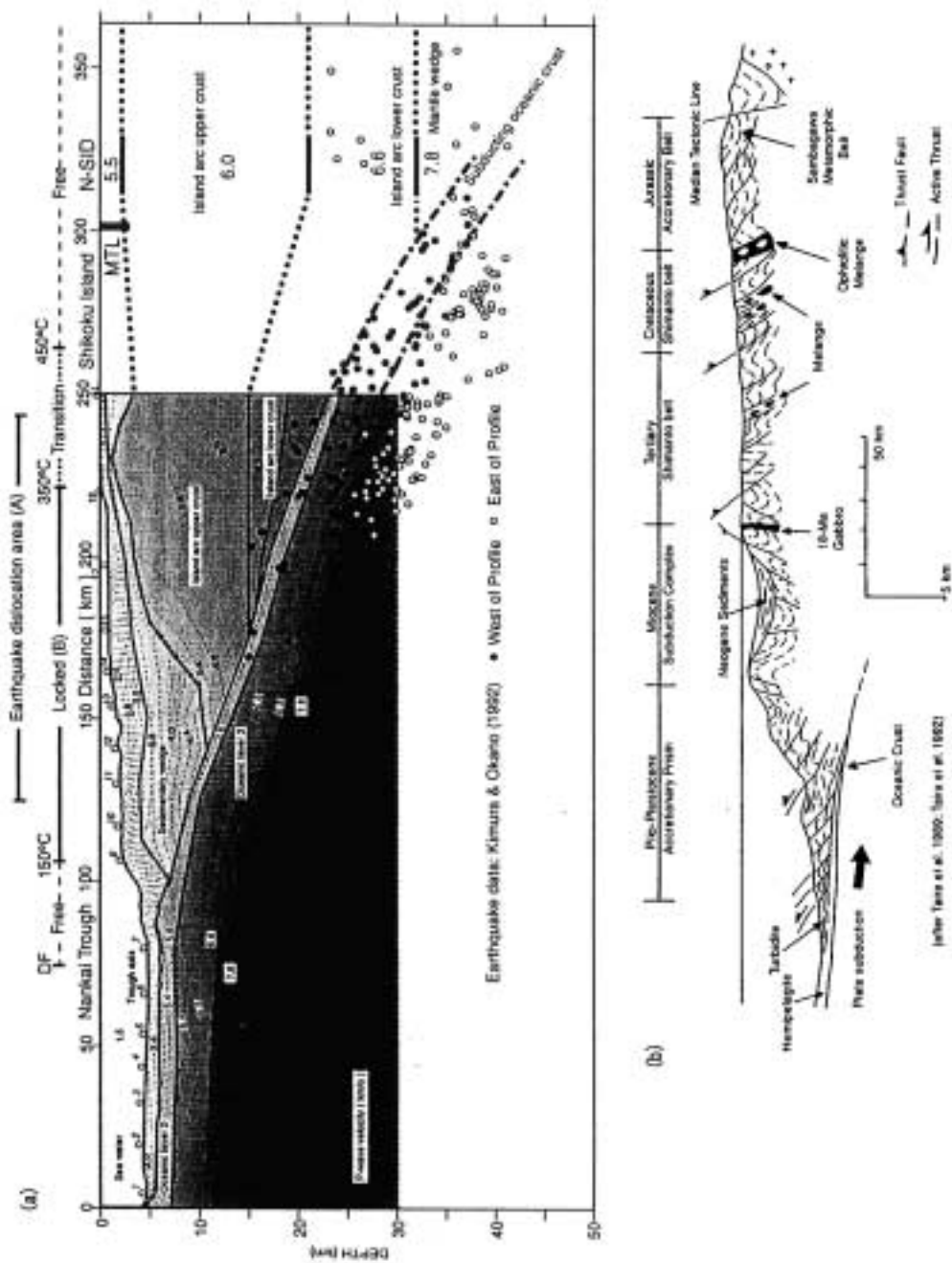


Figure 17. (a) Crustal transect consisting of the model in Figure 12, hypocenter distributions beneath Shikoku Island [Kimura and Okano, 1992], and a result from a land refraction survey [Kami et al., 1982]. N-S1D, top right in Figure 17a, indicates one-dimensional version of the crustal structure at the northern part of SID profile [Kami et al., 1982] shown in Figure 2. A is an earthquake dislocation area estimated by tsunami and geodetic data of the 1946 earthquake [Ando, 1982]. Free, locked (B) and transition areas represent presumed zones of stable sliding, stick slip and transition from stick slip to stable sliding zone on the top of the oceanic crust, respectively. 150°C, 350°C, and 450°C indicate critical boundary temperatures between these zones [Hyndman et al., 1995]. MTL, median tectonic line; DF, deformation front. (b) A schematic geological cross section across the Muroto cape [Taira et al., 1989; Taira et al., 1992b], which is located 30–50 km east of Figure 17a.

図8 四国周辺のP波速度構造 [Kodaira et al. (2000) より引用]

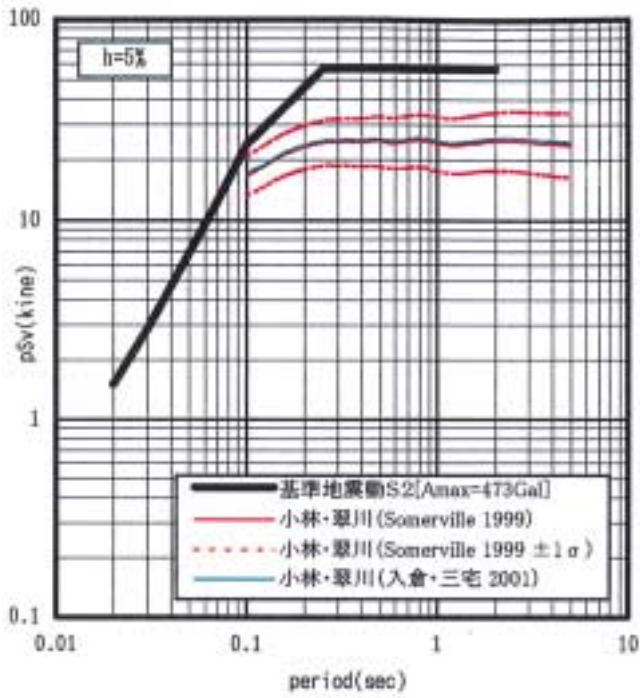


図9 地震動評価結果 25 kmモデル (2001年評価)

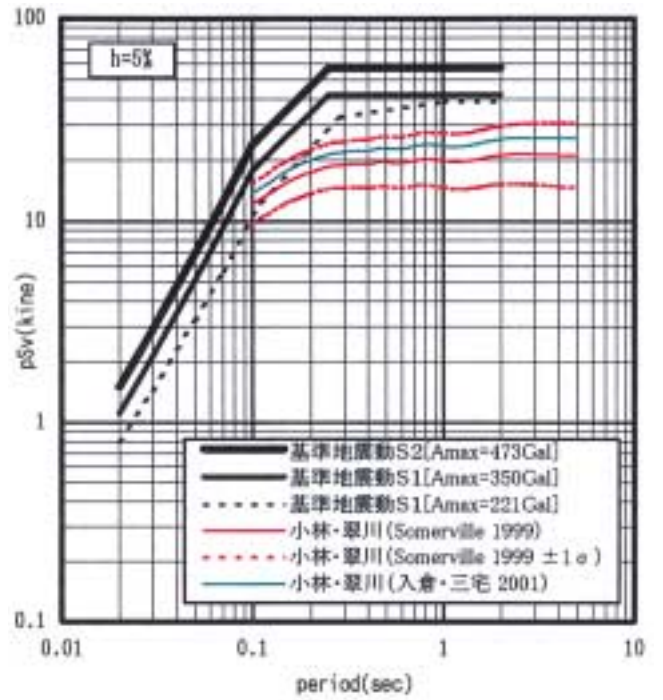


図10 地震動評価結果 46 kmモデル (2001年評価)

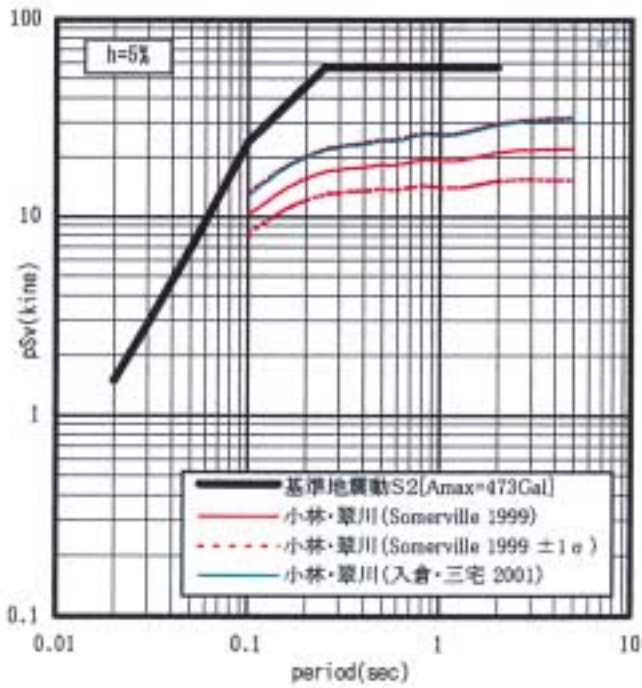


図11 地震動評価結果 77 kmモデル (2001年評価)

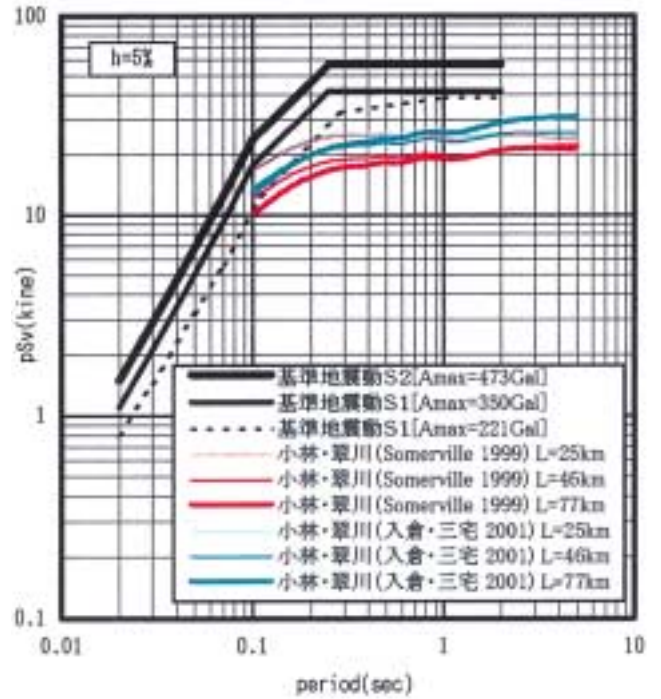


図12 断層長さによる影響を比較 (2001年評価)

表5 アスペリティモデルにおける断層パラメータの比較

断層諸元	記号	単位	断層パラメータ	
			1997年四国電力株	入倉レシビに基づく設定
断層長さ	L	km	46.0	46.0
断層幅	W	km	18.0	18.0
断層面積	全体	S	828.0 (100%)	828.0 (100%)
	アスペリティ	Sa	243.0 (29%) ※1	182.2 (22%) ※2
	背景領域	Sb	585.0 (61%)	645.8 (78%)
地震モーメント	全体	M ₀	2.57E+26 ※3	3.25E+26 ※4
	アスペリティ	M _{0a}	1.86E+26 ※5	1.43E+26 ※6
	背景領域	M _{0b}	7.10E+25	1.82E+26
モーメントマグニチュード	Mw	—	6.9 ※7	6.9 ※7
アスペリティの個数	—	個	3	2と仮定
応力降下量	全体	Δσ	50 ※8	—
	アスペリティ	Δσ _a	100 ※9	126 ※10
	背景領域	Δσ _b	15 ※11	27 ※12
平均すべり量	全体	D	0.99 ※13	0.98 ※14
	アスペリティ	Da	1.91 ※15	1.96 ※5
	背景領域	Db	0.30 ※16	0.70 ※16
断層傾斜角	δ	度	90	90
断層上端深さ	H	km	2	2
破壊伝播速度	V _R	km/s	2.5	2.5
基盤のS波速度	V _s	km/s	3.5	3.5
剛性率	μ	dyne/cm ²	4.0E+11 ※17	4.0E+11 ※17
破壊伝播様式	—	—	放射状伝播	放射状伝播
破壊開始位置	—	—	北東端最深部	北東端最深部

※1 ; Somervilleほか(1993) Sa=0.26×S および断層面の分割を考慮して設定

※2 ; Somerville et al. (1999) Sa=0.22×S

※3 ; Somervilleほか(1993) S=2.05×10⁻¹⁵×M₀^{2/3}

※4 ; 入倉・三宅(2001) S=4.59×10⁻¹¹×M₀^{1/2} (安全側に入倉・三宅(2001)を適用)

※5 ; M_{0a}=μ×Da×Sa

※6 ; 入倉ほか(2001) M_{0a}=0.44×M₀

※7 ; Kanamori (1977) logM₀=1.5Mw+16.1

※8 ; 佐藤(1989) 日本における平均値

※9 ; すべり量に比例すると仮定 Δσ_a=Δσ×(Da/D)=Δσ×(1.91/0.99)≒Δσ×2

※10 ; 入倉ほか(2001)

※11 ; すべり量に比例すると仮定 Δσ_b=Δσ_a×(Db/Da)

※12 ; 入倉ほか(2001) Δσ_b=2.436×M_{0b}/Sb^{3/2} (円形クラックの式を準用)

※13 ; Somervilleほか(1993) D=1.55×10⁻⁷×M₀^{1/3} [cm]

※14 ; Aki (1966) M₀=μDS

※15 ; Somervilleほか(1993) Da=3.0×10⁻⁷×M₀^{1/3} [cm]

※16 ; Db=M_{0b}/(μ×Sb)

※17 ; 1984年評価時の設定値

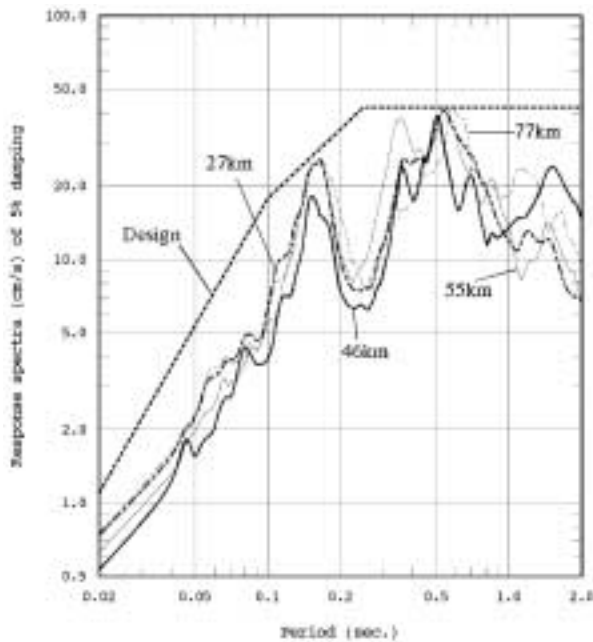


図13 断層長さによる影響の比較
(経験的グリーン関数法 $L = 27, 46, 55, 77$ km)
[Fukushima et al. (2001) より引用]

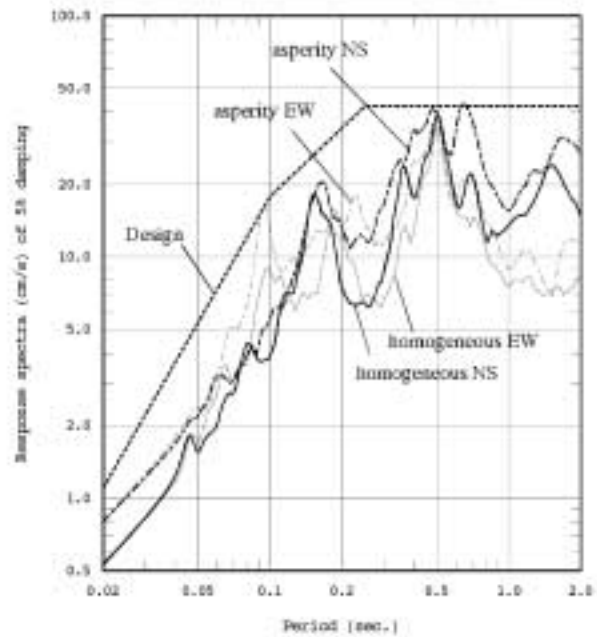


図14 一様モデルとアスペリティモデルの比較
(経験的グリーン関数法 $L = 46$ km)
[Fukushima et al. (2001) より引用]

5. まとめ

1984年の3号炉申請以降、MTLの活動性評価や強震動予測手法に関する新たな調査結果や知見が示された。四国電力(株)においては、その都度、耐震安全性の評価を実施し、以下の事項を確認した。

まず、1984年の評価で最も厳しい地震動を与えた小林・翠川の手法による評価では、

- ①岡村教授等による調査結果を考慮して、敷地前面海域の断層群を安全上、基準地震動S1対象とした場合においては、従来の基準地震動S1(最大加速度221Gal)を上回るため、新たに350Galの基準地震動S1を設定した。
- ②また、工学的な見地から各種の長さを設定し感度解析を行った場合においては、従来の基準地震動S2(最大加速度473Gal)を上回るものはない。
- ③強震動予測に関する知見を考慮し、入倉レシピにしたがって断層パラメータを設定した場合にも、S1対象の46kmモデルにおいては350Galの基準地震動S1に、S2対象の25、46、77kmモデルについては473Galの基準地震動S2に包絡される。
- ④そして、新たに設定した350Galの基準地震動S1において、伊方発電所第1、2、3号機の各設備(建物・構築物、機器・配管類)の耐震安全性を確認した結果、各設備に発生する応答値は許容値以内であり、伊方発電所の耐震安全性は確保

される。

ことを確認した。

さらには、近年の強震動予測手法の主流となっている経験的グリーン関数法による評価でも、上記①および②を確認した。上記③については、入倉レシピを厳密に適用した解析は実施していないものの、思想的に整合のとれた解析を実施し、基準地震動に包絡されることを確認しており、実質的には③も確認されているものと評価できる。

6. おわりに

強震動予測手法や活断層評価手法の進歩、さらには地震観測体制の充実などにより、今後も従来の評価とは異なる新しい調査結果や知見が示されることも予想される。そうした際に、新たな知見に対して適切な評価を行うと共に、知見が正当と認められ、施設の耐震安全性への影響が懸念される場合において、施設の耐震安全性確認を行うことは、原子力発電所という社会的重要な施設を抱えている電力会社にとっては責務ともいえるものであろう。

本報告は、こうしたこれまでの我々の取り組みの中から、地震動評価に関する検討の一部をとりまとめたものである。伊方発電所の耐震安全性の確保に万全を期すことはもちろんのこと、地震防災すなわち社会全体としての地震災害の軽減に役立つことができれば幸いである。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、東京工業大学翠川教授、京都大学入倉教授、(株)大崎総合研究所福島首席研究員には、有益な議論・助言・ご指導をいただいた。以上の方々に深謝し、ここに記して謝辞とさせていただきます。

【参考文献・資料】

- 大野裕記・小林修二・長谷川修一・本莊静光・長谷川正（1997）；四国北西部伊予灘海域における中央構造線活断層系の深部構造とセグメンテーション、四国電力(株)研究期報、No.68、p48-59
- 四国電力(株)（1984）；伊方発電所（3号炉）原子炉設置変更許可申請書
- Kanai,K., T.Suzuki（1968）；Expectancy of the maximum velocity amplitude of earthquake motions at bed rock, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 46, p 663-666.
- 小林啓美・翠川三郎（1981）；半実験式に基づく震源近傍での地震動スペクトルの推定、第18回自然災害科学総合シンポジウム
- 村松郁栄・入倉孝次郎（1981）；余震または前震記録の合成による本震時の強震動の予測、自然災害特別研究成果、昭和56年5月
- 佐藤良輔（1984）；不規則なsubslipを伴う断層modelから発生する地震波、自然災害特別研究成果、昭和59年10月
- Dan,K., T.Watanabe., T.Tanaka（1990）；Stability of earthquake ground motion synthesized by using different small-event records as empirical Green's functions, Bull. Seism. Soc. Am. 80, p 1433-1455
- Fukushima,Y., M.Mori, S.Matsuzaki, S.Kobayashi, Y.ohno（2001）；Semi-empirical estimation of ground motion using observed records at a site in Shikoku,Japan,Journal of Seismology 5, p 63-72.
- 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2、28、p 269-284
- 岡村眞（1996）；伊方原発沖（伊予灘）にも活断層、えひめ雑誌、5-10、p 28-33
- 資源エネルギー庁原子力発電企画安全審査課・原子力発電安全管理課（1997）；伊方発電所第1、2、3号機の耐震安全性について、第72回原子力安全委員会資料第2号、平成9年11月
- 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・宮腰研・香川敬生（2001）；特定の活断層を想定した強震動の予測手法—強震動予測レシピ—、<http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/irikura/welcomeJ.html>
- Somerville,P., K.Irikura, R.Graves, S.Sawada, D.Wald, N.Abrahamson, Y.Iwasaki, T.Kagawa, N.Smith, A.Kowada（1999）；Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters,Vol. 70,No. 1 ,p 59-80.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵（2001）；M8クラスの大地震の断層パラメータ—断層長さ、幅、変位、面積と地震モーメントの関係—、<http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/irikura/welcomeJ.html>
- Aki,K.（1966）；Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16,1964, Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo,Vol. 44,p 73-88
- Kanamori,H.（1977）；The energy release in great earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 20, p 2981-2987
- Geller,R.J.（1976）；Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitude, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, No. 5, p 1501-1523
- Kodaira,S., N.Takahashi, J.O.Park, K.Mochizuki, M.Shinohara, and S. Kimura（2000）；Western Nankai Trough seismogenic zone: Results from a wide-angle ocean bottom seismic survey, J.Geophys. Res., Vol. 105, No.B 3, p 5887-5905
- Kobayashi,H., S.Midorikawa（1982）；A semi-empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Ground Motions with Regard to Fault Rupture, Proceedings of the Seventh European Conference on Earthquake Engineering, p 161-168
- Dan, K., T.Sato（1998）；Simulation of strong ground motions in the near field of the 1979 Imperial valley, California, earthquake by semi-empirical method based on variable-slip rupture model, Proc. 10th Japan Earthq. Eng. Symposium, p 703-708
- Somerville,P., 入倉孝次郎、澤田純男、岩崎好規、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、p291-194
- 佐藤良輔（1989）；日本の地震断層パラメータ・ハンドブック、鹿島出版会