

# 原子力発電所における基準地震動と2011年東北地方太平洋沖地震の地震動について

D1-08050 大野 覚司

## 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震において、多くの原子力発電所で被害が出ている。福島第一原子力発電所における津波被害が注目され津波対策やアクシデントマネジメントが考えられているが、他の原子力発電所における被害や地震動そのものによる影響も決して無視できないものである。また日本地震工学会でも地震動の影響を重視し、福島第一、第二原子力発電所や女川原子力発電所などにおける強震動記録等を公開している。

## 2. 研究の流れ

原子力発電所の設計における指針において地震動は非常に重要視され、様々な手法において安全性の確認がされる。しかしながら今回の東北地方太平洋沖地震のように、非常に広域における複数の断層が同時に破壊される地震動が再現できていたかどうかは疑問である。

特にマグニチュードや等価震源距離から応答スペクトルを求める経験的手法においては、気象庁マグニチュードの頭打ちによる問題などにより、適用できるかどうかさえ分からない。そのため、本研究では現在の基準地震動の妥当性についての検討を行うこととする。福島第一原子力発電所、女川原子力発電所に加え、kik-net観測点における検討も行う。

## 3. 基準地震動策定の流れ

本研究で主に検討を行うものは、原子力発電所の設計用地震動である基準地震動である。基準地震動とは敷地周辺の地質・地質構想並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的知見から施設の供用期間中に極めて稀に発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあるとされる地震動のことである。構造体や主要な設備などはこの地震動を基準として設計されている。また、この基準地震動は表層や構造物が無いものと想定し、 $V_s=0.7\text{km/s}$ 以上の値を有する硬質地盤の解放基盤表面において設定される。<sup>1)</sup>

基準地震動策定の流れとしては、まず、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動として、過去の地震や活断層、プレート境界などの調査を行い、それを基に敷地に大きな影響を与えると予想される地震を検討用地震とする。その検討用地震から経験的手法から応答スペクトルを設定する方法と断層モデルを設定する方法、さらに震源を特定せず策定する地震動からの応答スペクトルを用い、地震波を作成する。その際、算出される波形は解放基盤相当面におい

てなので、その地点から地表までの地盤の立ち上げの処理を行う。

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトルは本研究で主に取り扱う女川原子力発電所及び福島第一原子力発電所では敷地ごとに震源を特定し策定する地震動の応答スペクトルに包絡されるので、考えないものとする。

また本研究では、耐専式による経験的手法からの応答スペクトルによる検討のみを行う。

耐専式から地震波形を作成する手順を示す。まず計算式及びコントロールポイントからターゲットとなる加速度応答スペクトルを算出する。次に位相角を乱数とした正弦波の重ね合わせをターゲットスペクトルにフィッティングさせる。その波形を振幅包絡線により補正する。それぞれの計算式及び係数等は以下に示す。

$$S(T) = S_b(T) \times \alpha(T) \times \beta(T)$$

$$\alpha_h(T) = \begin{cases} \left(\frac{V_s}{V_{sb}}\right)^{-\delta_h(T)} & (T \leq T_{sl}) \\ \left(\frac{V_s}{V_{sb}}\right)^{-\delta_h(T_{sl})} & (T > T_{sl}) \end{cases}$$

$$\beta_h(T) = \begin{cases} 1 & (T \leq T_{sl}) \\ \left(\frac{T}{T_{sl}}\right)^{-\log\alpha_h(T_{sl})} & (10T_{sl} > T \geq T_{sl}) \\ 10^{-\log\alpha_h(T_{sl})} & (T \geq 10T_{sl}) \end{cases}$$

式1 耐専式及び補正項の計算式

$S_b(t)$ : 地震基盤における水平地震動の応答スペクトル

$V_s$ : 解放基盤のS波速度(km/s)

$V_{sb}$ : 地震基盤のS波速度(km/s)

$T_{sl}$ : 地盤の卓越周期

$\delta(T)$ : コントロールポイントの補正係数

表1 地震基盤における水平地震動の応答スペクトル

M <sub>l</sub>	X <sub>eq</sub> (km)	コントロールポイントの座標								
		A	B	C	D	E	F	G	H	
		T <sub>a</sub> (s)	T <sub>b</sub> (s)	T <sub>c</sub> (s)	T <sub>d</sub> (s)	T <sub>e</sub> (s)	T <sub>f</sub> (s)	T <sub>g</sub> (s)	T <sub>h</sub> (s)	
極近距離	8.5	40	1.82	18.44	27.32	47.87	68.05	64.68	53.52	40.06
	8	25	1.89	20.05	28.84	48.22	67.8	65.25	52.51	38.35
	7	12	1.4	17.2	24.84	39.86	43.42	36.42	25.15	17.85
	6	6	1.04	12.82	18.51	21.84	23.17	17.41	9.64	3.88
近距離	8.5	80	0.73	7.36	11.43	22.92	34.79	32.58	27.8	21.96
	8	50	0.87	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.7	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.84	19.1	24.83	20.69	14.48	10.37
	6	8	0.77	9.45	13.65	16.23	17.18	12.73	7.16	2.89
中距離	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	16.04	14.98	12.73	10.37
	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.68	4.87	3.64
	6	25	0.21	2.49	3.6	4.54	4.84	3.98	2.07	0.86
遠距離	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.1	0.8	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
	7	125	0.046	0.43	0.7	1.34	1.81	1.59	1.28	1.05
	6	78	0.041	0.45	0.85	0.95	1.03	0.8	0.49	0.22

表2 コントロールポイントの補正係数

	コントロールポイントの補正係数							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	TA(s)	TB(s)	TC(s)	TD(s)	TE(s)	TF(s)	TG(s)	TH(s)
	0.02	0.09	0.13	0.3	0.6	1	2	5
$\delta(T)$	0	0.03	0.05	0.35	0.48	0.61	0.8	0.83

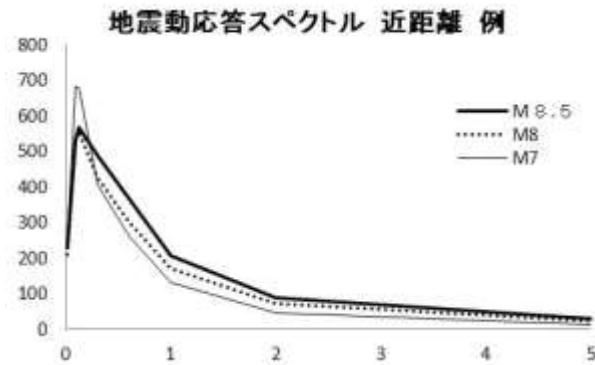


図1 地震基盤の加速度応答スペクトル 近距離

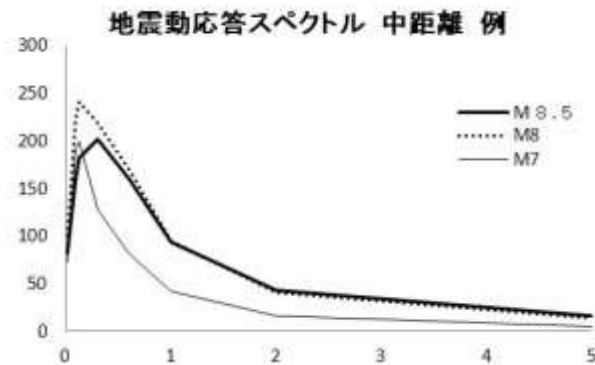


図2 地震基盤の加速度応答スペクトル 中距離

$$E(T) = (T/T_b)^2 \quad (0 < T \leq T_b)$$

$$E(T) = 1 \quad (T_b < T \leq T_c)$$

$$E(T) = e^{\frac{\ln(0.1)}{T_d - T_c}(T - T_c)} \quad (T_c < T \leq T_d)$$

$$T_b = 10^{0.5M - 2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M - 1}$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

式2 振幅包絡線の計算式

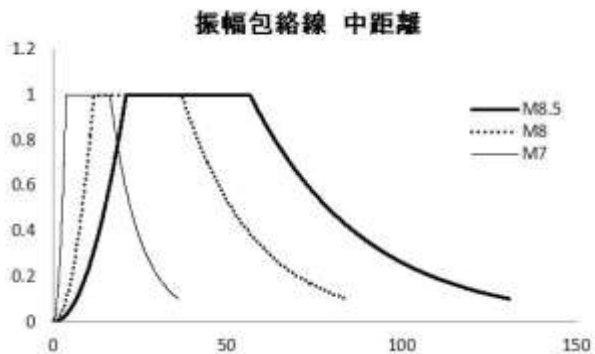


図3 中距離における振幅包絡線

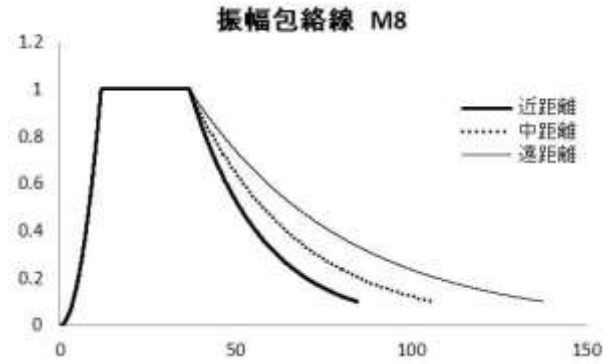


図4 M8における振幅包絡線

図1、図2の地震基盤の加速度応答スペクトルにおいて各マグニチュードにあまり差がないように見える。しかし、近距離や中距離等の定義される等価震源距離はマグニチュードが大きくなるほど長くなるため、結果的に、同距離の比較においてマグニチュードが大きいのほうが地震地盤の加速度応答スペクトルも大きくなる。

#### 4. 地震のパラメータ

今回の地震を検討用地震とし、耐専式の経験的手法から応答スペクトルを設定する。今回の地震は元々想定されていた複数の震源域が破壊されることで発生している。そのため、マグニチュード等のパラメータは、分割されたカスケードモデルと、一体であるとするスケーリングモデルの二通りで検討する。

カスケードモデルとは、断層面は一体ではなく分割された断層の重ね合わせであるとするモデルである。今回の東北地方太平洋沖地震ではMw9.0の巨大地震が起こったのではなく、元来想定されていた宮城県沖や三陸沖南部海溝よりなどの断層において、Mj8.2~7.5程度の地震が連続して起こったと考えるものである。

比較のための観測点は女川原子力発電所とし、スケーリングモデル及びカスケードモデル各パラメータと女川原子力発電所までの等価震源距離は表3に示す。

表3 地震基盤における水平地震動の応答スペクトル

	Mj	等価震源距離 (km)	断層破壊開始時間の遅れ(s)	元となった地震
スケーリングモデル	8.4	121	0	2011年東北地方太平洋沖地震
三陸沖南部海溝より	7.7	123.4	0	1897年三陸沖南部海溝よりの地震
宮城県沖	8.2	100.1	37	女川原発の想定宮城県沖地震
福島県沖	7.5	200	55	1938年福島県東方沖地震
茨城県沖	7	241.9	79	2008年茨城県地震
三陸沖北部から房総沖海溝より	8.2	230	49	明治三陸地震

比較結果を図5、図6に示す。スケーリングモデル、カスケードモデルどちらも観測をうまく表現できていないことが分かる。スケーリングではMw9.0を取り扱うことが出来ずMj8.4で計算したこと、カスケードモデルでは震源

域の設定が上手くあっていなかったことが原因と考えられる。

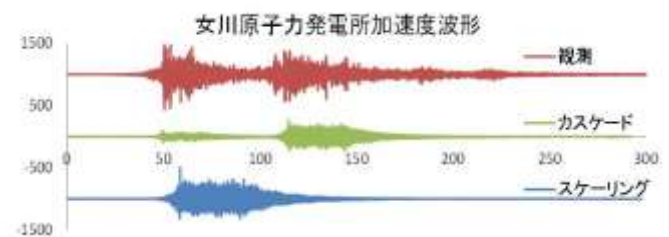


図 5. 女川原子力発電所加速度波形

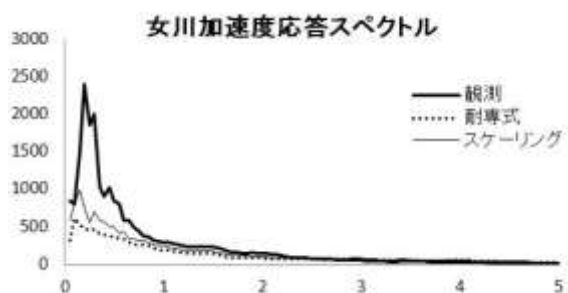


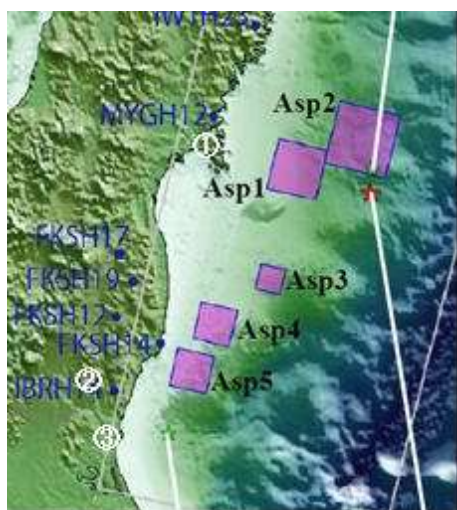
図 6. 女川原子力発電所加速度応答スペクトル

カスケードモデルにおいて、正確な震源域の設定のために断層面のアスペリティのみを考慮した 2011 年東北地方太平洋地震 (Mw9.0) の震源のモデル化 (強震動生成域) (第 1 報) の震源のモデル化を使用する。<sup>2)</sup>

それぞれのアスペリティにおけるパラメータと各観測点までの距離を表 4、図 7 にまとめる。また使用する観測点は特徴的であった女川原子力発電所、高萩、ひたちなかとする。<sup>3)4)5)</sup>

表 4. 各アスペリティのパラメータ及び観測点までの距離

		アスペリティ				
		1	2	3	4	5
アスペリティ のパラメータ	面積 (km <sup>2</sup> )	1600	2500	400	900	900
	Mo	$9.9 \times 10^{20}$	$22.1 \times 10^{20}$	$1.77 \times 10^{20}$	$2.39 \times 10^{20}$	$2.58 \times 10^{20}$
	Mw	7.93	8.16	7.43	7.52	7.54
観測点まで の距離 (km)	女川原発	54.5	106.5	102.5	133.3	181.9
	高萩	213.7	265.0	135.6	78.6	31.2
	ひたちなか	237.5	279.1	147.9	103.1	63.4



- ① 女川原子力  
発電所
- ② kik-net  
高萩
- ③ kik-net  
ひたちなか

図 7. 東北地方太平洋沖地震のアスペリティ<sup>2)</sup>

## 5. 比較・検討

ひたちなかに比べ高萩、女川において、観測記録と計算結果がよく一致している。また破壊伝播方向によりそれぞれのアスペリティによる波群がばらける女川で、加速度波形の形状が観測とカスケードにおいてよく一致していることが確認できる。

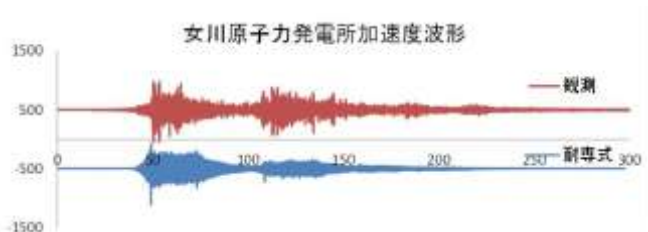


図 8 女川原子力発電所加速度波形

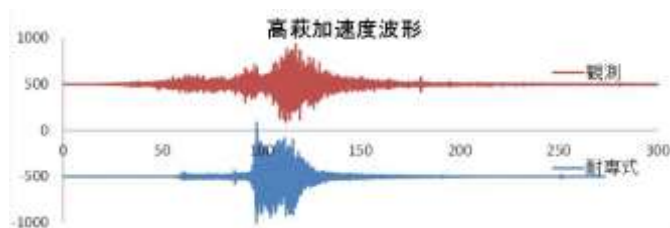


図 9 高萩加速度波形

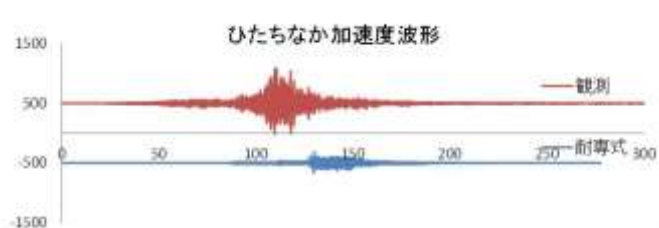


図 10 ひたちなか加速度波形

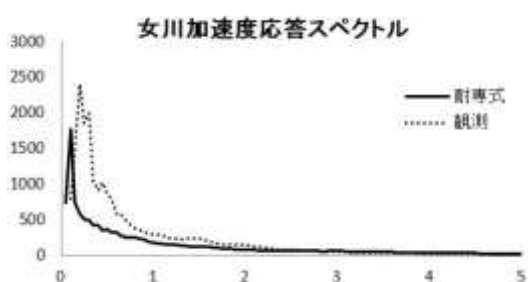


図 11 女川原子力発電所加速度応答スペクトル

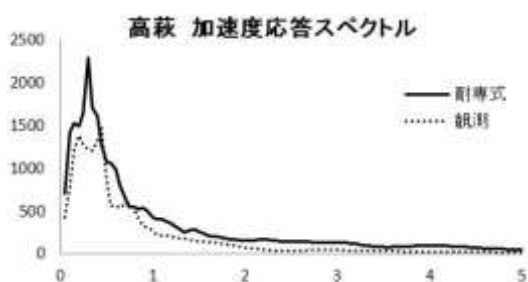


図 12 高萩加速度応答スペクトル

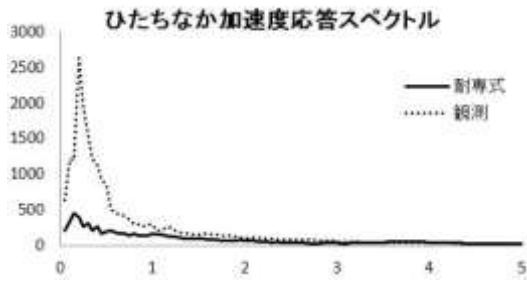


図 13 ひたちなか加速度応答スペクトル

本来、高萩とひたちなかではアスペリティにより近い位置にあるのは高萩である。そのため計算結果においては高萩の方が大きくなる。しかし実際の観測結果ではひたちなかの方が大きくなっている。

そのため、耐専式に考慮されない地盤のサイト特性などの影響が含まれている可能性がある。

## 6. 余震との比較

ひたちなかにおける地盤のサイト特性について検討を余震による比較により行う。耐専式の限界であるマグニチュード 8.5 より小さい余震による確認を行う。使う余震は表 2 の通りである。

表 5 余震のパラメータと観測点までの距離

マグニチュード	地震パラメータ			観測点(km)	
	東経	北緯	発生日時	ひたちなか	高萩
7.7	141.27	36.1	3/11-15:15	68	98

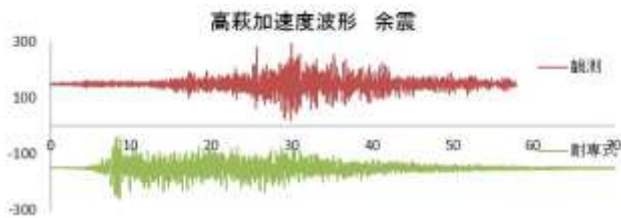


図 14 高萩加速度波形 余震

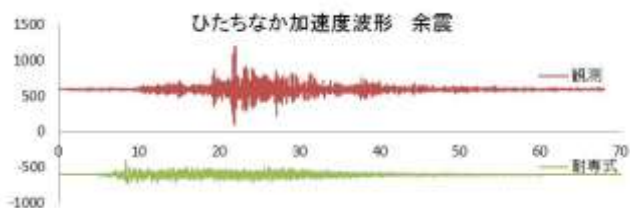


図 16 ひたちなか加速度波形 余震

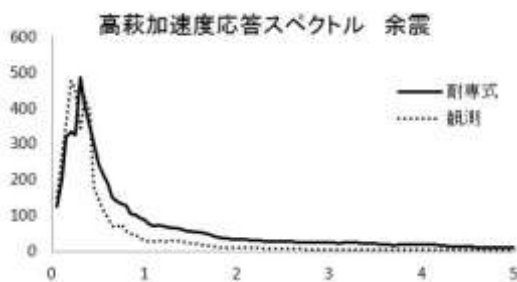


図 17 高萩加速度応答スペクトル 余震

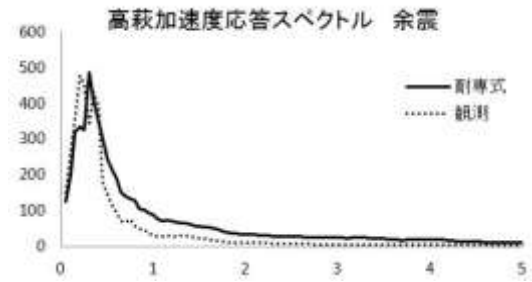


図 18 ひたちなか加速度応答スペクトル

こちらの余震による比較でも高萩ではよく一致し、ひたちなかではかなり過小評価になっている。この比較では断層の分割などの影響はないため、ひたちなかのサイト特性によるものと考えられる。

## 7. まとめと今後

今回、アスペリティのみを考慮したカスケードモデルの使用などにより、耐専式によるマグニチュード 9.0 の巨大地震のある程度の再現性が確認できた。ただし、耐専式にはサイト特性に対する考慮がなく、今後の研究となる。

## 参考文献

- 1)原子力規定委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008、pp.5-30,101-105、2008年12月
- 2)釜江克宏、川辺秀憲：2011年東北地方太平洋地震(Mw9.0)の震源のモデル化(強震動生成域)(第1報2011年4月26日)
- 3)日本地震工学会：東北電力(株)女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ、2011年7月
- 4)日本地震工学会：平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震における福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所で観測された強震観測記録等の強震データ記録、2011年6月
- 5)防災科学技術研究所、基盤強震観測網 kik-net ホームページ <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>

## 謝辞

本研究を行うにあたり担当教授である久田嘉章教授を始め、久保智弘特任助教授、鱒沢曜氏にはご指導や資料の提供等をしていただきました。

また、防災科学研究所強震ネットワーク(K-Net)の観測記録並びに日本地震工学会様の東北電力(株)女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ及び平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震における福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所で観測された強震観測記録等の強震データ記録を利用させていただきました。

最後になりましたが久田研究室の大学院生の松本俊明氏、新田龍宏氏及び久田研究室卒業生の方々にもご協力をいただきました。皆様方に感謝の意を表させていただきます。