地震・津波1-5-1

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 における地震動シミュレーション結果について (福島第一・福島第二、女川、東海第二)

平成23年9月30日 原子力安全·保安院

はじめに

- ◇平成23年東北地方太平洋沖地震(以下、「本震」という。)については、これまでにGPS 記録、津波観測記録、強震観測記録、遠地地震観測記録を用いた種々の震源モデル が提案されている。
- ◇これらのうち、原子力施設の耐震設計に重要な短周期成分を含む強震動を説明する 震源モデルとして、釜江・川辺(2011)(以下、「釜江・川辺モデル」という。)、入倉・倉橋 (2011)(以下、「入倉・倉橋モデル」という。)等が提案されている。
- ◇本資料は、本震の震源特性を把握することを目的として、釜江・川辺モデル及び入倉・ 倉橋モデルを用いた各原子力発電所(女川、福島第一、福島第二及び東海第二)の 強震動シミュレーション解析について取りまとめたものである。

東北地方太平洋沖地震の概要

■発震日時: 2011年3月11日 14時46分頃

■震源地 : 三陸沖

■地震諸元:

規模	Mw9.0)	
震央位置	北緯	38度	6.2分
	東経	142度	51.6分
震源深さ	24km		



東北地方太平洋沖地震の概要

距離減衰式と観測された値との比較(PGAおよびPGV)[暫定]



【防災科研による】

2011年東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析

強震動を説明する震源モデルを用いてシミュレーション解析を行い、計算された波形が各 原子力発電所(女川、福島第一、福島第二、東海第二)で得られた観測記録を再現してい るかを確認する。



I. 釜江・川辺モデルを用いた強震動シミュレーション解析

- 1. 釜江・川辺モデルの概要
- ◇太平洋沿岸部のKiK-net観測記録(0.1~10Hz)を用いて、 経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングに基づき、 強震動生成域のモデル化を行った結果、宮城県沖、岩手県 南部沖、福島県沖、茨城県沖等の5箇所に強震動生成域を 配置した震源モデルを提案。
- ◇提案したモデルによって、岩手県沿岸から茨城県沿岸に かけての観測点における特徴的な観測波形がほぼ再現 できたとしている。
- ◇ただし、結果は暫定的なもので、今後、余震記録等を使ってより定量的な検討が必要としている。

グ	リー	ン関数	なとして	使用し	た地震	の震源	パラン	(―タ
---	----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----

Origin Time (JST)*	2005/10/19 20:44	2011/3/10 3:16
Latitude (deg.)*	36.382	38.271
Longitude (deg.)*	141.043	142.879
Depth (km) [*]	48.3	28.9
Mj*	6.3	6.4
Mo (Nm)**	3.18 × 10 ¹⁸	1.10 × 10 ¹⁸
Strike/dip/rake ^{**} (deg.)	25/68/88 209/22/94	22/71/90 201/19/89

*気象庁, **F-net

【釜江・川辺(2011)より抜粋】



本震及びグリーン関数として使用した地震の震央位置、 KiK-net観測点、並びに強震動生成域の位置

1. 釜江・川辺モデルの概要



5つの強震動生成域からなる震源モデル

		Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走行	(°)	195	195	195	195	195
傾斜角	(°)	13	13	13	13	13
面積	(km ²)	40×40	50×50	20 × 20	30 × 30	30 × 30
地震モーメント	(N•m)	4.93 × 10 ²⁰	1.10 × 10 ²¹	8.8×10^{19}	1.19 × 10 ²⁰	2.58×10^{20}
応力降下量	(MPa)	18.9	21.6	27.0	10.8	23.1
ライズタイム	(s)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破塐開始時間	(s)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリーン として用いた	ン関数 :地震	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2005/10/19 20:44 M6.3

釜江・川辺モデルの震源パラメータ

【釜江・川辺(2011)より抜粋】

2. 釜江・川辺モデルを用いたKiK-net観測点のシミュレーション解析結果





KiK-net観測点の観測波形(黒線)とシミュレーション結果(赤線)【釜江・川辺(2011)より抜粋】

2. 釜江・川辺モデルを用いたKiK-net観測点のシミュレーション解析結果





KiK-net観測点の観測波形(黒線)とシミュレーション結果(赤線)【釜江・川辺(2011)より抜粋】

3. 釜江・川辺モデルを用いた原子力発電所のシミュレーション解析

- ◇各原子力発電所のシミュレーション解析は、釜江・川辺モデルの検討でグリーン関数として用いた地震の観測記録が各発電所の敷地で得られていることから、経験的グリーン関数法により行う。
- ◇なお、女川原子力発電所のシミュレーション解析においては、 宮城県沖に設定されている強震動生成域(Asp1及び2)の 寄与が大きいことから、これら2つの強震動生成域のみ考慮 している。
- ※以下の評価結果は全て、釜江・川辺(2011)と同様、0.1~10Hzのフィルター処理 を行っている。

	要素地震A ^{※3}	要素地震B ^{※3}
発 生日時 ^{※1}	2005/10/19 20:44	2011/03/10 03:16
震源地 ^{※1}	茨城県沖	宮城県沖
北 緯(゜)※1	36.382	38.271
東経(°) ^{※1}	141.043	142.879
震源深さ(km) ^{※1}	48.3	28.9
地震規模M ^{※1}	6.3	6.4
地震モーメントMo ^{※2}	3.18 × 10 ¹⁸	1.10×10 ¹⁸

釜江・川辺モデルの要素地震の諸元

※1:気象庁による。

※2:F-netによる。

※3:要素地震AはAsp5に、要素地震BはAsp1~4に用いている。



釜江・川辺モデルと各原子力発電所の位置関係

3.1 釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

◇東海第二発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

3.1 釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

◇周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%)【釜江・川辺(2011)より抜粋】



◇東海第二発電所の応答スペクトル(h=5%)



・シミュレーション結果は、東海第二発電所及び周辺観測点の応答スペクトルを概ね再現したものとなっているとしている。

3.1 釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

◇各強震動生成域による応答スペクトルの比較(h=5%)





・短周期側(約0.5~0.6秒以下)では、敷地に最も近い強震動生成域であるAsp5の影響が支配的であり、それより長周期側ではAsp5以外の強震動生成域による影響を受けているとしている。

◇福島第一原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



◇福島第二原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

◇周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%)【釜江・川辺(2011)より抜粋】



・シミュレーション結果は、福島第一・福島第二原子力発電所及び周辺観測点の応答スペクトルを概ね再現したものとなっているとしている。

◇各強震動生成域による応答スペクトルの比較(h=5%)



3.3 釜江・川辺モデルを用いた女川原子力発電所のシミュレーション解析結果

◇女川原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



女川原子力発電所自由地盤観測点(O.P.*-8.6m)における観測波形(黒線)とシミュレーション結果(赤線)

※O.P.: 女川原子力発電所工事用基準面(東京湾平均海面の下方0.74mに相当)

3.3 釜江・川辺モデルを用いた女川原子力発電所のシミュレーション解析結果

◇周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%)【釜江・川辺(2011)より抜粋】



◇女川原子力発電所の応答スペクトル(h=5%)



・女川原子力発電所の評価結果は観測記録よりもやや小さめとなっており、周辺のKiK-net観測点と同様の傾向となっているとしている。

Ⅱ.入倉・倉橋モデルを用いた強震動シミュレーション解析

1.入倉・倉橋モデルの概要

- ◇K-NET及びKiK-netの観測記録(0.1~8秒)を用いて、経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングに 基づき、強震動生成域のモデル化を行った結果、5箇所に強震動生成域を配置した震源モデルを提案。
- ◇各強震動生成域の位置は、地震調査研究推進本部による長期評価のための領域区分と対応しており、 SMGA1は三陸沖南部、SMGA2は三陸沖中部、SMGA3は宮城県沖、SMGA4は福島県沖、SMGA5は 茨城県沖にほぼ位置するとしている。
- ◇また、提案したモデルを用いて合成された波形は観測波形とよく一致するとしており、4箇所のKiK-net観測 点におけるシミュレーション解析結果から以下の考察がなされている。
 - 1) 震源のほぼ真西に位置するMYGH04観測点及びその北に位置するIWTH27観測点ではSMGA1~3からの3つの波群が顕著にみられる。
 - 2) 震源の南に位置するFKSH17観測点ではSMGA1~4の4つの強震動生成域の影響を受け複雑な波形 となっている。
 - 3)さらに南のIBRH16観測点は距離が離れているため、茨城県沖のSMGA5の影響のみとなる。

	Origin time	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Mw	strike (deg)	dip (deg)	rake (deg)
Event A	2011/3/10 6:24	38.271	142.879	6.5	22/213	68/23	85/101
Event B	2007/11/26 22:51	37.304	141.757	5.9	24/217	71/20	86/102
Event C	2009/2/1 6:52	36.717	141.279	5.7	25/232	76/15	83/116

グリーン関数として使用した地震の震源パラメータ

	Mo (Nm)	coner frequency (Hz)	Stress Drop (MPa)	Area (km²)
Event A	5.51E+18	0.22	11.8	108.9
Event B	7.66E+17	0.3	4.1	58.5
Event C	4.65E+17	0.48	10.4	22.9

【入倉・倉橋(2011)より抜粋】

1. 入倉・倉橋モデルの概要

入倉・倉橋モデルの震源パラメータ

	L (km)	W (km)	Mo(Nm)	Stress Drop (Mpa)	Delay time from Origin time (sec)
SMGA 1	62.40	41.60	2.31E+21	41.3	15.64
SMGA 2	41.60	41.60	7.05E+20	23.6	66.42
SMGA 3	93.60	52.00	4.34E+21	29.5	68.41
SMGA 4	38.50	38.50	3.83E+20	16.4	109.71
SMGA 5	33.60	33.60	3.99E+20	26.0	118.17

off central Sanriku 40'30' off central Sanriku 39"00" off Miyagi 404 off southerm Sanriku 55 FKSH17 37"30' Trench zone Ē off Japan trench Fukushima MGA4 IBRH16 off Ibaraki SMGA5 36'00' off Boso

【入倉・倉橋(2011)より抜粋】

5つの強震動生成域からなる震源モデル

2. 入倉・倉橋モデルを用いたKiK-net観測点のシミュレーション解析結果







KiK-net観測点の観測波形(黒線)とシミュレーション結果(赤線)【入倉・倉橋(2011)より抜粋】

3. 入倉・倉橋モデルを用いた原子力発電所のシミュレーション解析

- ◇各原子力発電所のシミュレーション解析は、入倉・倉橋モデルの検討でグリーン関数として用いた地震の観測記録が各発電所の敷地で得られていることから、経験的グリーン関数法により行う。
- ◇なお、女川原子力発電所のシミュレーション解析においては、 宮城県沖に設定されている強震動生成域(SMGA1及び3)の 寄与が大きいことから、これら2つの強震動生成域のみ考慮 している。
- ※以下の評価結果は全て、入倉・倉橋(2011)と同様、0.1~8秒のフィルター処理を 行っている。

	要素地震A ^{※3}	要素地震B ^{※3}	要素地震C ^{※3}
発生日時 ^{※1}	2011/03/10 06:24	2007/11/26 22:51	2009/02/01 06:51
震源地※1	宮城県沖	福島県沖	茨城県沖
北緯(°)*1	38.172	37.304	36.717
東 経(゜) ^{※1}	143.045	141.757	141.279
震源深さ(km) ^{※1}	9.3	44.1	47.0
地震規模M ^{※1}	6.8	6.0	5.8
地震モーメントMo ^{※2}	5.51 × 10 ¹⁸	7.66 × 10 ¹⁷	4.65 × 10 ¹⁷

入倉・倉橋モデルの要素地震の諸元

※1:気象庁による。

※2:F-netによる。

※3:要素地震AはSMGA1~3に、要素地震BはSMGA4に、要素地震CはSMGA5に 用いている。



入倉・倉橋モデルと各原子力発電所の位置関係

3.1 入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

◇東海第二発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



東海第二発電所GR01観測点(E.L.-372m)における 観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

3.1 入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

◇周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%) 【再現解析】



◇東海第二発電所の応答スペクトル(h=5%)



・シミュレーション結果は、東海第二発電所及び周辺観測点の応答スペクトルを概ね再現したものとなっているとしている。

3.1 入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果







・短周期側(約1秒以下)では、敷地に最も近い強震動生成域であるSMGA5の影響が支配的であり、それより長周期側では SMGA5以外の強震動生成域による影響を受けているとしている。

3.2 入倉・倉橋モデルを用いた福島第一・福島第二原子力発電所のシミュレーション解析結果 ◇福島第一原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



3.2 入倉・倉橋モデルを用いた福島第一・福島第二原子力発電所のシミュレーション解析結果 ◇福島第二原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

3.2 入倉・倉橋モデルを用いた福島第一・福島第二原子力発電所のシミュレーション解析結果 ◇周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%) 【再現解析】



30

◇各強震動生成域による応答スペクトルの比較(h=5%)



強震動生成域による影響を受けているとしている。

3.3 入倉・倉橋モデルを用いた女川原子力発電所のシミュレーション解析結果

◇女川原子力発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形



女川原子力発電所自由地盤観測点(O.P.-8.6m)における観測波形(黒線)とシミュレーション結果(赤線)

3.3 入倉・倉橋モデルを用いた女川原子力発電所のシミュレーション解析結果

◇女川原子力発電所の応答スペクトル(h=5%)



・女川原子力発電所の評価結果は観測記録よりもやや小さめとなっているとしている。

まとめ

- ◇本震の強震観測記録を説明する震源モデルとしてこれまでに提案された釜江・川辺 モデル及び入倉・倉橋モデルを用いた各原子力発電所の強震動シミュレーション解析 を行った。
- ◇その結果、いずれの震源モデルについても、シミュレーション結果は観測記録の応答 スペクトルを概ね再現していること、各発電所敷地における地震動の短周期成分は 敷地に近い強震動生成域による影響が支配的であることを確認したとしている。

(参考)既往のスケーリング則・検討用地震との比較

1. 対象とするパラメータ

- ◇釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルが本震の強震観測記録を概ね説明できることから、 これらの震源モデルの主要なパラメータを既往のスケーリング則と比較することは、本震の 震源特性を把握するうえで重要としている。
- ◇さらに、各原子力発電所における基準地震動Ssの策定にあたって考慮している検討用地震のパラメータと比較することにより、地域性を含めた震源特性の検討が可能としている。
- ◇ここでは、地震調査研究推進本部(2009)による「震源断層を特定した地震の強震動予測 手法(「レシピ」)」(以下、「強震動予測レシピ」という。)に示されているパラメータのうち、 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(以下、「短周期 レベル」という。)Aを対象として、比較を行うとしている。

◇壇ほか(2001)は、12の内陸地殻内地震の地震を対象として短周期レベルAを算定し、地震モーメントMoとの経験的関係について以下の式を提案している。また、提案式と6つの海溝型地震の短周期レベルを比較している。

A $[N \cdot m/s^2] = 2.46 \times 10^{10} \times (Mo [N \cdot m] \times 10^7)^{1/3}$

- ◇強震動予測レシピによると、海溝型地震の短周期 レベルの値は、条件に応じて下記のいずれかの 方法により求めるとされている。
 - 1)想定震源域における最新活動の地震の短周期 レベルが推定されていない場合

→ 壇ほか(2001)による上式により設定。

- 2)想定震源域における最新活動の地震の短周期 レベルが推定されている場合
 - →その推定値と地震モーメントとの経験的関係 の傾向を参照して、想定する地震の地震モー メントに応じた短周期レベルを設定。



【壇ほか(2001)より抜粋】

◇各原子力発電所におけるプレート間地震の検討用地震については、いずれも想定震源域における過去の 地震の短周期レベルが推定されているとしており、具体的な短周期レベルの設定方法は以下のとおり。

女川原子力発電所

想定宮城県地震の短周期レベルは、地震調査研究推進本部(2002)による宮城県沖地震の震源モデル を踏まえて提案された壇ほか(2005)による連動型宮城県沖地震の特性化震源モデルのパラメータに 基づき設定。

福島第一·福島第二原子力発電所

塩屋崎沖の地震の短周期レベルは、池田ほか(2008)により提案されている1938年塩屋崎沖地震群の 特性化震源モデルのパラメータに基づき設定。

東海第二発電所

鹿島灘の地震の短周期レベルは、佐藤(2003)が短周期レベルを評価したプレート間地震のうち、茨城 県沖で発生した地震の値を参考として、基本震源モデル及び不確かさを考慮した震源モデルの短周期 レベルを設定。

◇釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルから推定される短周期レベルと、壇ほか(2001)による経験的関係 並びに各原子力発電所における検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して以下に 示す。



地震モーメント[N·m]

※実線は壇ほか(2001), 点線はその2倍と1/2倍。

ここで、釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルの短周期レベルは、壇ほか(2001)による以下の式に基づき 算定される各強震動生成域の短周期レベルの総和とし、地震モーメントはUSGSによる値としている。

 $A = 4\pi \cdot (S_a / \pi)^{0.5} \cdot \Delta \sigma_a \cdot \beta^2$ (Sa:アスペリティ面積、 $\Delta \sigma_a$:強震動生成域の応力降下量、 β :S波速度)

・釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルから推定される短周期レベルは、既往のスケーリング則及び各原子力発電所 における検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して、特異な傾向を示していないとしている。

◇また、釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルを用いた強震動シミュレーションの結果、地震動の短周期成分は敷地に近い強震動生成域による影響が支配的であることから、仮に各強震動生成域が個別の震源であると考え、各強震動生成域から推定される短周期レベルと、壇ほか(2001)による経験的関係並びに各原子カ発電所における検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して以下に示す。



・釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルの各強震動生成域から推定される短周期レベルは、壇ほか(2001)による経験 的関係の2倍程度となっているが、各原子力発電所における検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと 比較して特異な値ではないとしている。

参考文献

- ◇釜江克宏・川辺秀憲(2011):2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の震源のモデル化(強震動生成域)、 日本地球惑星科学連合2011年大会
- ◇京都大学原子炉実験所釜江研究室ホームページ:http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/
- ◇入倉孝次郎・倉橋奨(2011):2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域のための震源モデル、 日本地球惑星科学連合2011年大会
- ◇入倉孝次郎地震動研究所ホームページ: http://www.kojiro-irikura.jp/
- ◇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、 第545 号

◇地震調査研究推進本部(2009):「全国地震動予測地図」報告書