

## 参考資料集 2

# 女川2号 3.11地震の観測記録の特徴についての検討

---

※女川2号 審査会合資料(プレート間地震)から抜粋等

2022年5月18日  
東北電力株式会社

## 1. プレート間地震の断層モデル

# 経験的グリーン関数法の検討の概要

### 【コメント】

断層モデルを用いた地震動評価は統計的グリーン関数法だけではなく、2011年東北地方太平洋沖地震(3.11地震)の前震、余震等の記録が十分にあることから、経験的グリーン関数法による検討も行うこと。



### 【経験的グリーン関数法による検討の位置づけ】

- ・M9プレート間地震の地震動評価は、3.11地震による敷地での観測記録との整合性を統計的グリーン関数法(放射特性一定)により確認したシミュレーションモデル及び計算方法を踏襲する。したがって、本評価方法は、審査ガイドに記載されている「手法の妥当性」を示した手法の採用に該当すると考えている。
- ・一方、審査ガイドでは、要素地震としての観測記録がある場合は、経験的グリーン関数法を用いた地震動評価についての確認を行う旨の記載があるため、経験的グリーン関数法を用いた3.11地震のシミュレーション解析について検討を実施した。

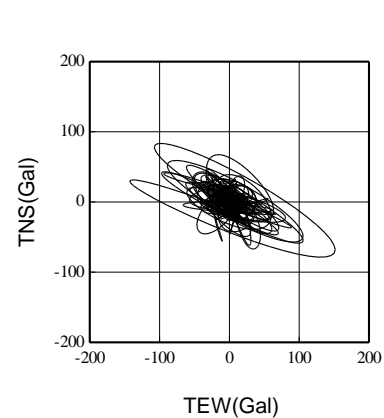
### 【検討の内容】

- ・3.11地震の敷地直近の強震動生成域(SMGA)付近で発生したプレート間地震について、大地震と中小地震の特性について観測記録の傾向を比較し、大地震と中小地震ではその特徴に違いが認められた。
- ・2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2)は、3.11地震と記録の特徴に類似性が認められる。この地震をM9プレート間地震の要素地震とするには、規模が大きい等の課題があるが、参考に要素地震とした場合の地震動を算定した。算定結果は観測記録の傾向を捉えているが、全体的に大きな結果となった。
- ・また、3.11地震と傾向が異なる中小地震を要素地震とした場合の地震動を、参考に算定した。算定結果は、大地震と中小地震の傾向が特に異なるNS方向の周期0.5秒付近で過小な結果となった。

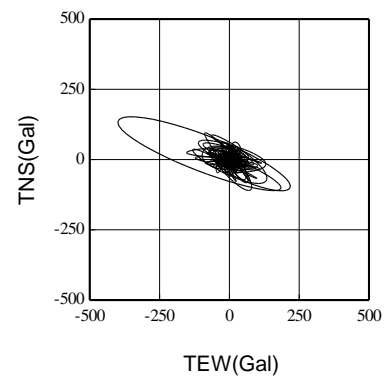
# 1. プレート間地震の断層モデル

## 3.11地震のNS方向 周期0.5秒付近の卓越について

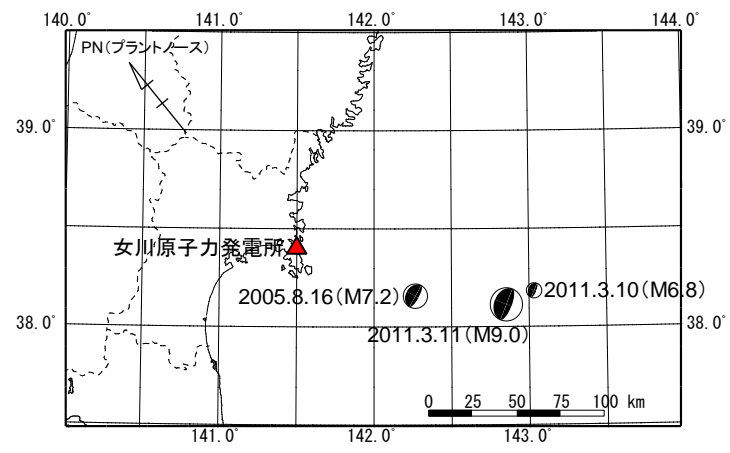
- ・3.11地震と2005年宮城県沖の地震(M7.2)の敷地での観測記録には、NS方向の周期0.5秒付近に卓越が認められるが、これは震源方向(ラジアル方向)の揺れであり、2011年3月10日(M6.8)の地震をはじめ、他の中小地震には認められない傾向である。
- ・なお、このような特徴は、牡鹿半島以外の観測点の観測記録には、顕著には認められない傾向である。



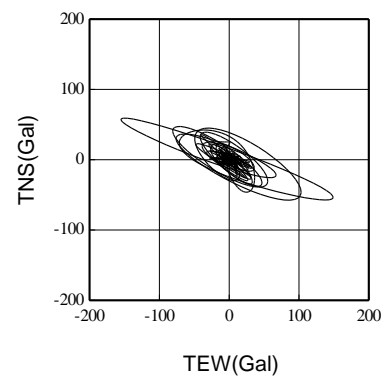
3.11地震(前半0~80秒)



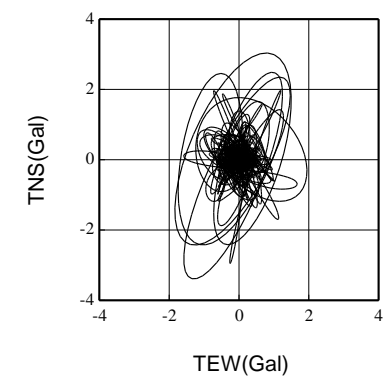
3.11地震(後半80~300秒)



要素地震の震央位置



2005年8月16日宮城県沖の地震



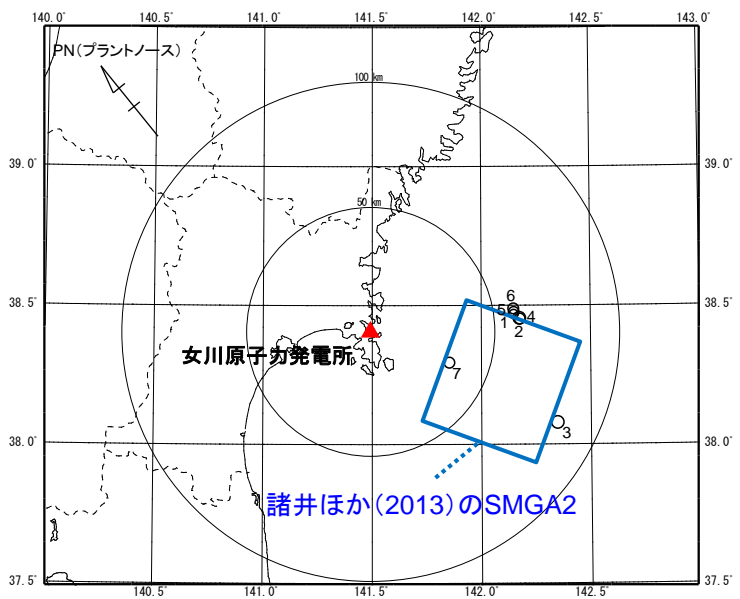
2011年3月10日 宮城県沖の地震(M6.8)

加速度記録の水平面のオービット(バンドパス0.5~3.0Hz)

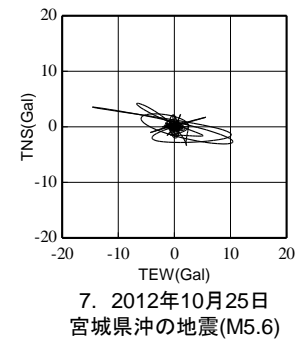
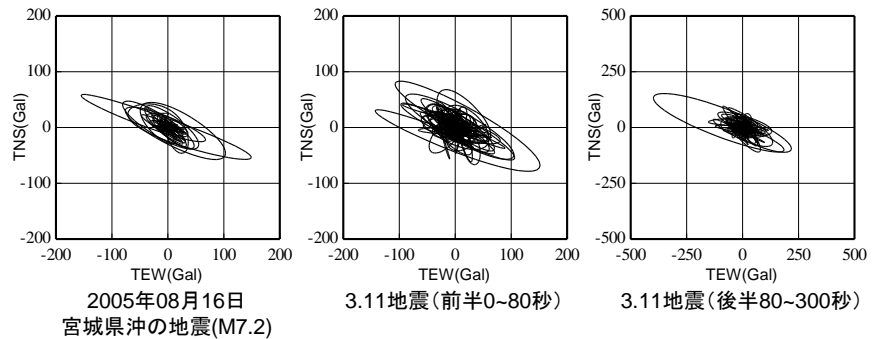
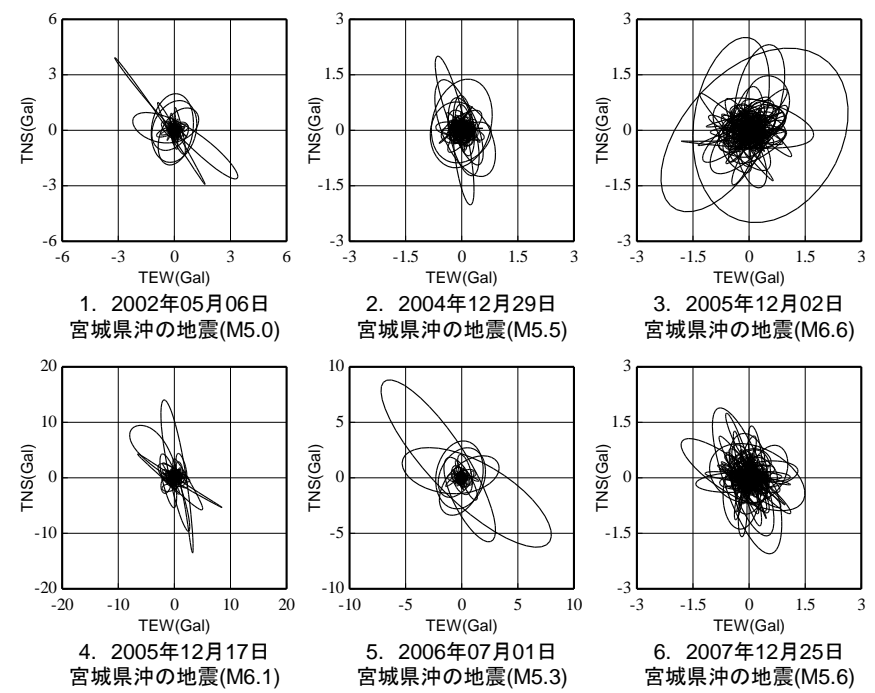
# 1. プレート間地震の断層モデル

## 3.11地震のNS方向 周期0.5秒付近の卓越について

- ・SMGA2付近で発生した中小地震 (M5以上の地震) のプレート間地震について、3.11地震と同様に周期約0.5秒付近において震源方向 (ラジアル方向) が卓越する特徴があるか確認を行った。
- ・中小地震については、3.11地震のような震源方向 (ラジアル方向) が卓越する地震はなかった。



震央分布図  
(M5以上のプレート間地震)

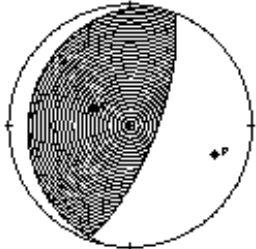


加速度記録の水平面のオービット (バンドパス0.5~3.0Hz)

# 1. プレート間地震の断層モデル

## SMGA2付近で発生した中小地震のメカニズム解

2002/05/06,17:12



38.4N 142.2E 41km Mw4.9  
strike: 21 dip: 73 slip: 93  
mxx:-0.12 mxy: 0.44 mxz: 0.87  
myy:-1.49 myz:-2.14 mzz: 1.61  
unit:1e+16 moment:2.82e+16Nm

1. 2002年05月06日  
宮城県沖の地震(M5.0)

2004/12/29,22:59



38.4N 142.3E 38km Mw5.6  
strike: 21 dip: 76 slip: 93  
mxx:-0.00 mxy: 0.38 mxz: 0.97  
myy:-1.30 myz:-2.39 mzz: 1.30  
unit:1e+17 moment:2.92e+17Nm

2. 2004年12月29日  
宮城県沖の地震(M5.5)

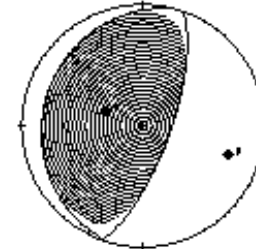
2005/12/02,22:13



38.1N 142.3E 35km Mw6.5  
strike: 21 dip: 71 slip: 89  
mxx:-0.35 mxy: 1.32 mxz: 1.50  
myy:-2.94 myz:-3.92 mzz: 3.29  
unit:1e+18 moment:5.39e+18Nm

3. 2005年12月02日  
宮城県沖の地震(M6.6)

2005/12/17,03:32



38.4N 142.2E 44km Mw6.0  
strike: 20 dip: 72 slip: 91  
mxx:-0.11 mxy: 0.17 mxz: 0.31  
myy:-0.59 myz:-0.84 mzz: 0.70  
unit:1e+18 moment:1.12e+18Nm

4. 2005年12月17日  
宮城県沖の地震(M6.1)

2006/07/01,08:28



38.4N 142.2E 44km Mw5.2  
strike: 22 dip: 72 slip: 94  
mxx:-0.32 mxy: 0.97 mxz: 2.21  
myy:-3.61 myz:-5.00 mzz: 3.93  
unit:1e+16 moment:6.72e+16Nm

5. 2006年07月01日  
宮城県沖の地震(M5.3)

2007/12/25,23:04



38.5N 142.2E 41km Mw6.0  
strike: 19 dip: 71 slip: 94  
mxx:-0.04 mxy: 0.17 mxz: 0.37  
myy:-0.75 myz:-0.97 mzz: 0.79  
unit:1e+18 moment:1.31e+18Nm

6. 2007年12月25日  
宮城県沖の地震(M5.6)

2012/10/25,19:32



38.3N 141.9E 50km Mw5.6  
strike: 31 dip: 69 slip: 96  
mxx:-0.25 mxy: 0.71 mxz: 1.16  
myy:-1.68 myz:-1.72 mzz: 1.93  
unit:1e+17 moment:2.85e+17Nm

7. 2012年10月25日  
宮城県沖の地震(M5.6)

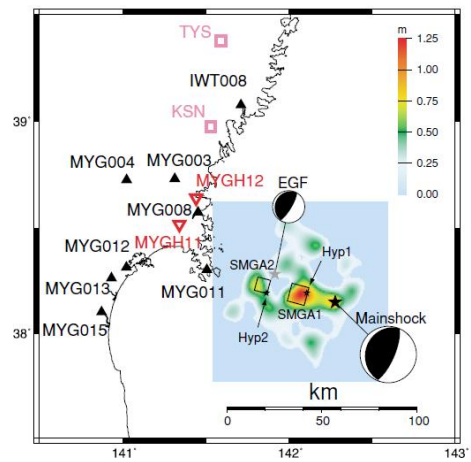
# 1. プレート間地震の断層モデル 経験的グリーン関数法の検討の概要

## ■ 経験的グリーン関数法の検討内容

- ・SMGA2付近で発生した中小地震(M5より大きい地震)のプレート間地震では、周期約0.5秒付近において震源方向(ラジアル方向)が卓越する地震は得られていない。
- ・一方、3.11地震と周期0.5秒付近の傾向が類似する2005年宮城県沖の地震(M7.2)の場合、震源域が大きく、また震源が複雑な地震(Suzuki and Iwata(2007)等)であるため、経験的グリーン関数法への適用には課題がある。



- ・参考に、2005年宮城県沖の地震(M7.2)を要素地震した場合と、要素地震として適切なM6クラスの中小地震を要素地震とした場合の2ケースについて、3.11地震のシミュレーション解析を実施し、その結果を確認した。



- ・Suzuki and Iwata(2007) では、Wu and Koketsu(2006)のすべりの大きい領域に対応するように2つのSMGAを設定している。
- ・Wu and Koketsu(2006)のすべり分布の領域は約50km × 50kmになっており、諸井ほか(2013)のSMGAの1つ分と同程度の面積となっている。

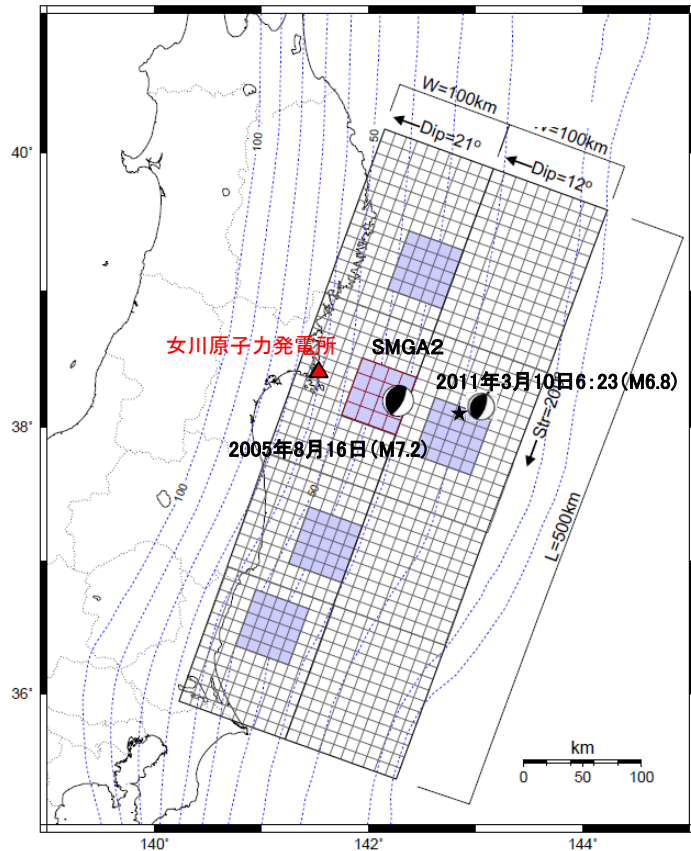
2005年8月16日宮城県沖の地震(M7.2)の断層モデル  
(Suzuki and Iwata(2007))

# 1. プレート間地震の断層モデル

## 諸井ほか(2013)を用いた経験的グリーン関数法

### ■ 諸井ほか(2013)の断層モデルを用いた経験的グリーン関数法

- 要素地震は、震源域内にあり震源メカニズムが同様のプレート間地震で、長周期までSN比が明瞭な2005年宮城県沖の地震(M7.2)と2011年3月10日の地震(M6.8)の2つの地震を選定し、波形合成にそれぞれ用いる。
- 2005年宮城県沖の地震(M7.2)は、3.11地震の観測記録の特徴を有しているが、比較的規模が大きく、震源過程が複雑であり、経験的グリーン関数法の要素地震として用いるのは課題があるものの本検討に用いる。また、通常経験的グリーン関数法で用いられる適切な規模のM6クラスの地震として3.11地震の震源に近い2011年3月10日の地震(M6.8)を用いる。
- 諸井ほか(2013)の断層モデルのうち敷地に最も影響が大きいSMGA2(応力降下量:24.6MPa)のみを対象として経験的グリーン関数法により地震動評価を行う。なお、波形合成は、入倉ほか(1997)により評価を行う。



断層モデル

要素地震の諸元

発生日時※1	2005年8月16日 (11:46)	2011年3月10日 (6:23)
震源地※1	宮城県沖	三陸沖
震源位置※1	東経142° 16.6' 北緯38° 8.9'	東経143° 02.6' 北緯38° 10.3'
震源深さ(km)※1	42	9
地震の規模 M※1	7.2	6.8
地震モーメントM <sub>0</sub> (N・m)※2	5.43 × 10 <sup>19</sup>	5.51 × 10 <sup>18</sup>
モーメントマグニチュードM <sub>w</sub>	7.1	6.5
応力降下量(MPa)※3	25.2	11.8

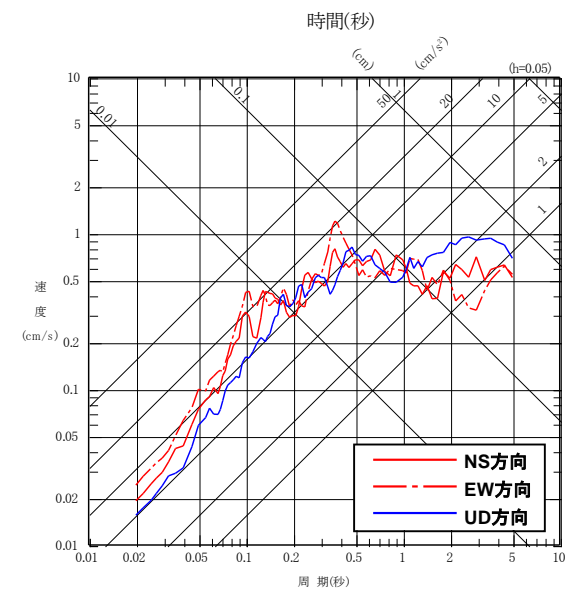
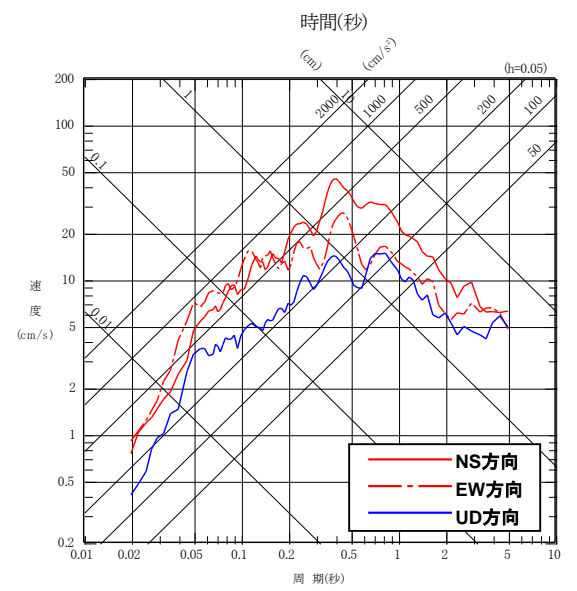
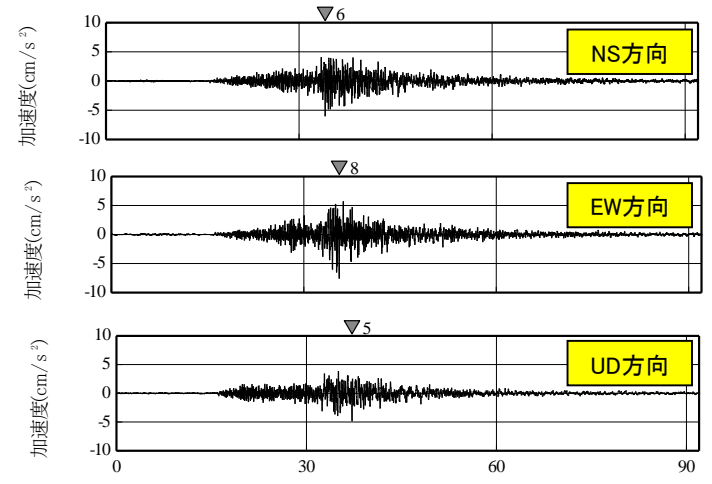
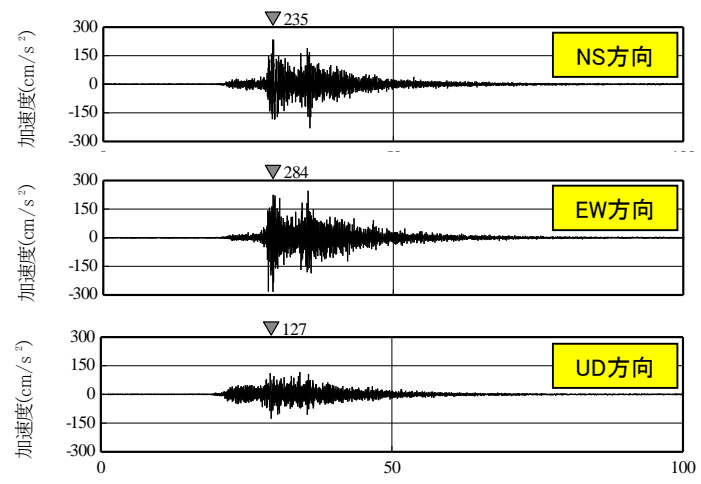
※1: 気象庁による。

※2: F-netによる値。

※3: 2005.8.16の地震は、Kamae(2006)による。2011.3.10の地震はKurahashi and Irikura(2011)による。

# 1. プレート間地震の断層モデル 経験的グリーン関数法に用いる要素地震

## ■要素地震の観測記録(解放基盤相当(O.P.-8.6m)でののはぎとり波)



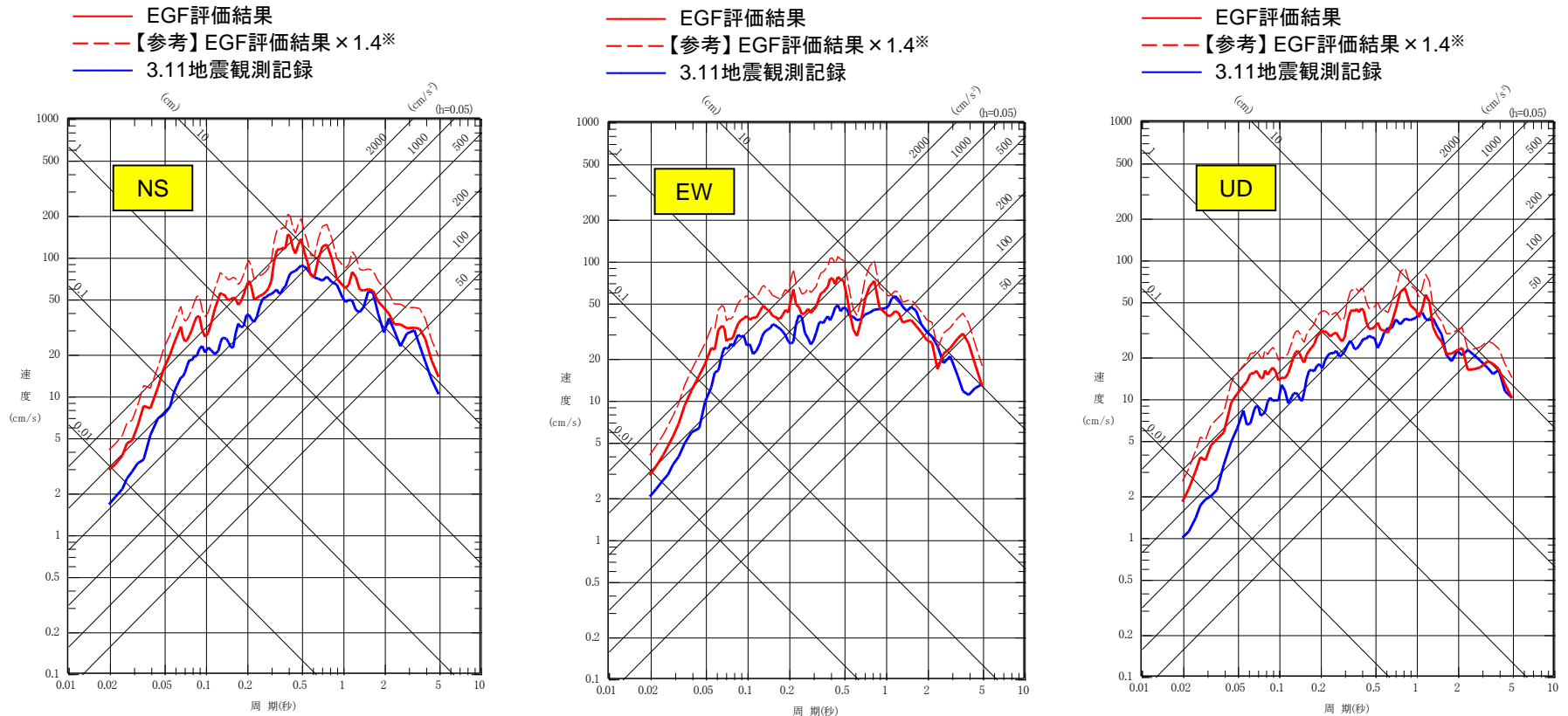
2005年8月16日 (11:46) の地震 (M7.2)

2011年3月10日 (6:23) の地震 (M6.8)



# 1. プレート間地震の断層モデル 諸井ほか(2013)を用いた経験的グリーン関数法

## ■地震動評価結果 要素地震2005年8月16日(M7.2) 応答スペクトル

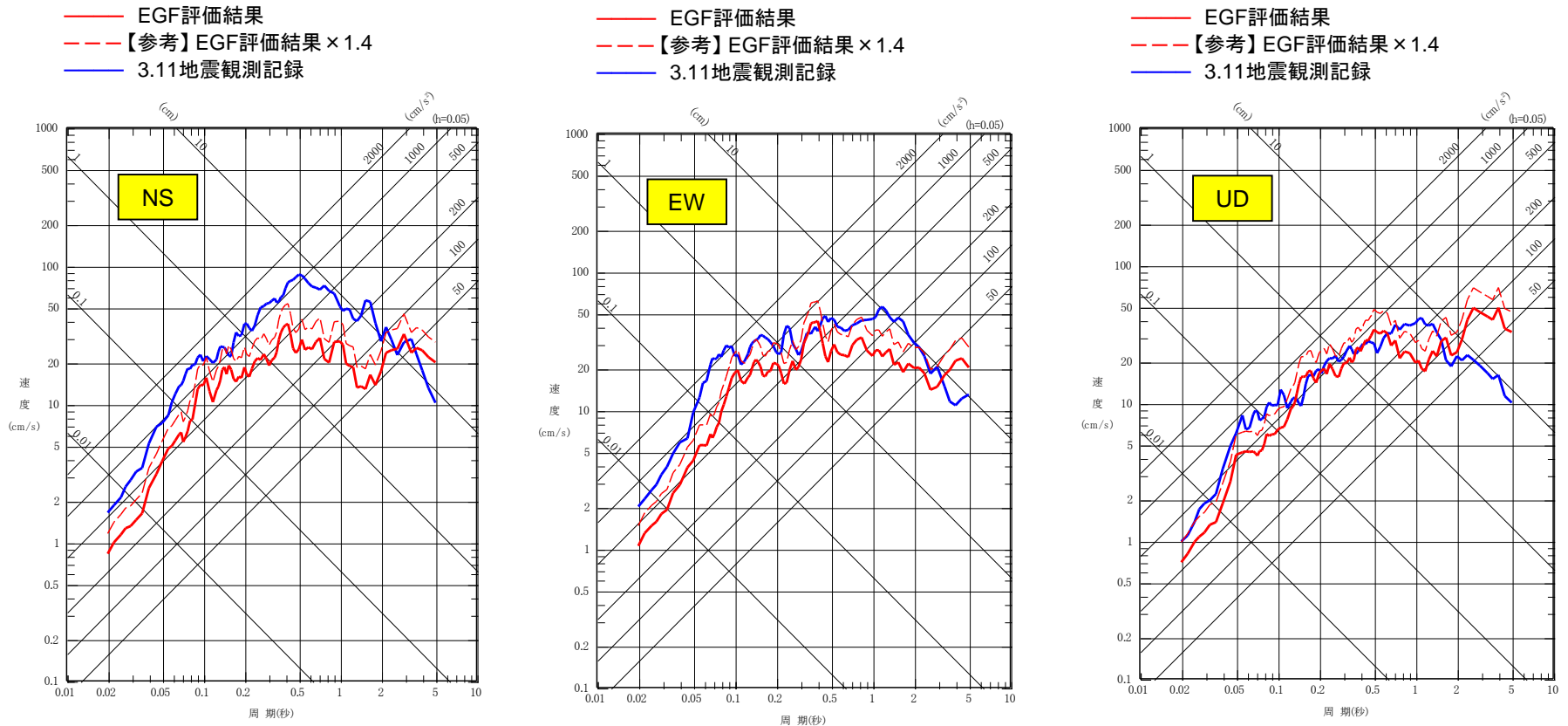


評価結果は、観測記録と同様にNS方向の周期0.5秒付近が卓越しており観測記録の特徴を再現できているが、一般的に過大な結果となった。

※諸井(2013)の断層モデル(応力降下量24.6MPa)を用いていることから、基本ケースの断層モデル(地域性考慮,応力降下量34.5MPa)相当との比較を行うため参考にEGFの結果を1.4倍した。

# 1. プレート間地震の断層モデル 諸井ほか(2013)を用いた経験的グリーン関数法

## ■地震動評価結果 要素地震2011年3月10日 (M6.8) 応答スペクトル



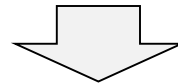
評価結果は、3.11地震(はぎとり波)と比較してEW方向やUD方向は記録と概ね整合するものの、NS方向の周期約0.5秒付近では過小な結果となった。

## 1. プレート間地震の断層モデル

## 経験的グリーン関数法の検討結果

## 【検討結果】

- ・3.11地震の敷地直近の強震動生成域(SMGA)付近で発生したプレート間地震について、大地震と中小地震の特性について観測記録の傾向を比較し、大地震と中小地震ではその特徴に違いが認められた。
- ・諸井ほか(2013)モデルを用いて、M7クラスの地震と中小地震を要素地震とした経験的グリーン関数法による検討を行った。
- ・2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2)は3.11地震と記録の特性に類似性が認められるが、M9プレート間地震の要素地震とするには2005年の地震の震源の拡がりなどを考慮すると適切ではない。参考に2005年の地震を要素地震とした場合の地震動を算定した結果は、観測記録の傾向を捉えているものの、全体的に大きな結果となった。
- ・また、3.11地震と傾向が異なる中小地震を要素地震とした場合の地震動を算定した。算定結果は、大地震と中小地震の傾向が特に異なるNS方向の周期0.5秒付近で過小な結果となった。



経験的グリーン関数法による強震動シミュレーション解析では、設定する断層モデルと要素地震の相対的關係によっても結果が左右されることにも留意し、宮城県沖の特徴を踏まえた経験的グリーン関数法によるプレート間地震の地震動評価の高度化検討を進めて行く。

# 地震動評価手法の高度化に向けた検討

## ▶ 司ほか(2015):EGFの高度化に関する検討(補正経験的グリーン関数法)

補正経験的グリーン関数を用いた2003年7月26日

M<sub>w</sub>6.0宮城県北部の地震の地震動評価

#司宏俊(サイスマリサーチ)・福土知司・石川和也(東北電力)・  
栗山利男(構造計画)

Simulation of strong ground motion from the 26, Jul, 2003  
M<sub>w</sub>6.0 Northern Miyagi-ken earthquake based on the  
modified empirical Green's function method

#Hongjun Si (SRI), Tomoji Fukushi, Kazuya Ishikawa (Tohoku-  
epco), and Toshio Kuriyama (KKE)

### 1. はじめに

経験的グリーン関数法では、グリーン関数として観測記録を用いることで、観測記録に影響を及ぼす伝播特性、地盤特性は、既に記録に含まれていると考えられるため、断層破壊過程を適切に考慮すれば地震動を精度よく推定できることが知られている。ただし、経験的グリーン関数法を適用するにはグリーン関数として使える適切な規模をもつ小地震の記録が必要である。しかし、このような小地震の記録が得られない場合が多い。司・栗田(2007)は、このような場合でも比較的規模の大きい地震の記録が得られるのであればそれを適切に補正することによってグリーン関数として使える補正経験的グリーン関数を作成することで経験的グリーン関数法を適用できるようにする方法を提案し、その後の研究でもその有効性が確認された(西條・ほか、2010)。本稿では、本手法を適用して、2003年7月26日7:13に発生した宮城県北部の地震による地震動を再現することを試みた。

### 2. 計算方法の概要

合成すべき対象地震に対して、比較的規模が大きい、シンプルな震源過程を持つ地震、または比較的単純な震源過程(SMGA)に分解できる地震の観測記録を経験的グリーン関数(EGF)として用いられるように次のように補正を行う。(1)経験的グリーン関数として用いる地震の震源スペクトル、または分解された単純な震源過程(SMGA)の震源スペクトルとして、地震モーメント、応力降下量などのパラメータにより評価される理論震源スペクトルを求めておく。(2)観測記録を周波数領域に変換して、(1)で得られた震源スペクトルで除したのち、合成対象地震の断層を離散化する要素地震の理論震源スペクトルで乗算して、さらに時間領域に逆変換することによって補正経験的グリーン関数を求められる。(3)この補正経験的グリーン関数

を用いて、通常の経験的グリーン関数法の手続きに従って合成対象地震による地震動を合成する。

### 3. 解析対象地震、観測点

本稿における合成対象地震は、2003年7月26日7:13分に発生したM<sub>w</sub>6.0宮城県北部の地震である。解析に用いる合成対象地震の断層モデルは大野(2007)によるものとした。この断層モデルでは、1つの強震動生成域(SMGA)からなる比較的シンプルなものである。SMGAのM<sub>w</sub>は約5.64、応力降下量は7.3Mpaとされている。地震動を合成する際には、SMGAのみを考慮することとした。この地震では、M<sub>w</sub>5.4の前震とM<sub>w</sub>5.2の余震も起きているが、規模が大きくそのままではEGFとして用いられない。一方、そのほかの余震に関しては、先行研究では、観測点によっては1秒より長周期成分ではEGFとして利用できないことが報告されている(池田ほか、2004)。本稿では、広帯域の地震動をシミュレーションするため、Hikima and Koketsu(2004)による結果を参考に、規模がM<sub>w</sub>5.4と若干大きい、震源メカニズムが本震と相似していて震源過程も比較的単純とみなせる前震の観測記録を用いて、補正経験的グリーン関数を作成したうえ、経験的グリーン関数法の手続きにより合成対象地震による地震動を合成することとした。解析対象は女川原子力発電所で得られた観測記録である。

### 4. 結果とまとめ

Fig.1に補正経験的グリーン関数を用いたシミュレーションの結果と観測記録の比較をEW、UD成分についてそれぞれ示す。図から、シミュレーション結果と観測記録はおおむね一致することを確認できた。

参考文献:司・栗田(2007), 連合大会予稿集; 西條・ほか(2010), 日本地震学会秋季大会; 池田・他(2004), 日本建築学会大会梗概集; 大野(2007), 日本建築学会地盤震動シンポジウム; Hikima and Koketsu (2004), EPS.

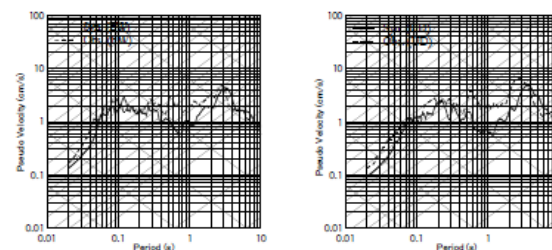


Fig.1 Comparison of observed and synthetic 5% damped pseudo response spectra  
(Left:EW; Right:UD)