# 2007年新潟県中越沖地震の 強震動と震源断層モデル

ー柏崎刈羽原子力発電所を襲った破壊的強震動ー

## 修正版:2007年9月4日

入倉孝次郎(愛知工業大学地域防災センター)・ 香川敬生・宮腰 研(地域 地盤 環境研究所)・ 倉橋 奨(愛知工業大学)

# 1.2007年中越沖地震はどんな地震?

- 2. 地震動は大きかったのか?
- 3. 強震動記録からみた震源モデル
- 4. 柏崎刈羽原子力発電所を襲ったキラー・ パルス
- 5.中間的まとめ

# 1.2007年新潟県中越沖地震はどんな地震か?

- 2007年新潟県中越沖地震は7月16日に新潟県上中越沖の深さ約10 kmで起こった。
- この地震の気象庁マグニチュードは6.8、遠地地震データのインバージョンから推定されたモーメント・マグニチュードは6.6であった。
- ・ 震度の大きいところ(震度6強)は、震源の南東の海岸沿いの<u>新潟県 刈羽村</u>から<u>柏崎</u>
   <u>市</u>にかけた地域に集中。それ以外にやや内陸の長岡市・および震源から南西方向
   約90 km離れた長野県飯綱町でも震度6強が記録された。柏崎刈羽原発の地表観測
   点では震度7(相当値)が記録された。
- 本震の発生機構は北西 南東方向に圧力軸をもつ逆断層型であった。
- この地震はプレート境界と考えられている日本海東縁部の延長に位置し、GPS観測によって新潟から南西方向に延びるひずみ集中帯の中で起こった。このひずみ集中帯では歴史的に繰り返し大地震が起こっているが、2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震は200年以上地震が起こっていない地震空白域に起こった(鷺谷.2007)。

震源断層

地殻変動データから推定される震源断層

 国土地理院は電子基準点による地殻変動観測、緊急の水準測量、人工衛星「だいち」の合成開口レーダーの干渉解析、などから北西傾斜の震源断層を最適モデルとして 発表している(2007年7月26日公表)。

#### 余震分布からの震源断層

- 気象庁: 北西傾斜か南東傾斜か特定できない
- 防災科研: 余震域の北寄りの地域は南東傾斜、南寄りは南東傾斜と北西傾斜の 2つの面にそって分布。
- 東大地震研:本震の破壊開始点は北西傾斜の断層面に位置し、本震直後の余震 も北西傾斜の断層面上に分布するが、その後、余震が南東傾斜の断層面に発生 し、最大余震(M<sub>IMA</sub> 5.8)は南東落ち断層面で発生。

#### 津波から推定される震源断層

• 北西落ちか南東落ちか特定できない

#### 活断層との関係

- 今回の地震の震源断層が南東傾斜の場合は、新潟県中越沖にある海底断層と 関係しており、また、北西傾斜の場合は、長岡平野西縁断層帯の深部延長上の 断層と関係していると考えられる(地震調査委員会,2007年8月8日)。
- 深海調査研究船「かいれい」による反射断面から、南東傾斜と北西傾斜の2つの 断層面が見られる(JAMSTEC, 2007年9月1日NHKスペシャルより)。

# 2. 震源で生成された強震動は大きかったのか?

- 地表で観測された地震動の最大加速度は経験的距離減衰式(司·翠川,1999)に
   ほぼ従っている。しかし、震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べてやや大。
- 岩盤上で観測された地震動の最大加速度の経験的距離減衰式(Fukushima and Tanaka, 1989)と比べると、柏崎刈羽原発の岩盤地中で得られた最大加速度は極めて 大きい。
- 岩盤での経験的関係式と観測データを適切に比較するには、岩盤地中記録から 岩盤地表地震動の推定(いわゆる「はぎとり」解析)が必要。
   「はぎとり」解析で推定された柏崎刈羽原発の500m/s層の表面での地震動の最大 加速度は約1000ガル(暫定的な評価結果)となる。
- 上記の解析結果から、この地震の強震動は一般的には従来の経験的距離減衰式と ほぼ同レベルとなるが、柏崎刈羽原発の岩盤での観測記録は岩盤データの経験的 距離減衰式に比べて顕著に大きい、ことがわかる。
- このことは、震源断層の破壊メカニズムにより柏崎刈羽原発が破壊的な強震動に 襲われたことを示唆している。

### 2007年中越沖地震の震源メカニズムと震度分布



### 本震 加速度記録





### 最大加速度の距離減衰式を作成するために 用いた震源断層モデル



北東側セグメント 走向 223°, 傾斜角 44°, すべり角 84°, すべり量 1.47m 南西側セグメント 走向 218°, 傾斜角 42°, すべり角 110°, すべり量 1.39m

### 地表観測に対する最大加速度の距離減衰式との比較



司·翠川(1999)の最大加速度(地表)の距離減衰式 と比較するために、観測値はNSとEW成分の大きい 方の値をプロット。

- 1号機地震小屋地表 890gal
- 5号機地震小屋地表 1223gal

### 岩盤地表上の観測に対する距離減衰式との比較



青実線は岩盤(地表)観測の経験式、緑実線は 中及び硬質地盤(地表)観測の経験式 (Fukushima and Tanaka, 1989)

はK-NETの地表観測点(地盤分類なし)の記録 ●、●は柏崎刈羽原発の岩盤地中(500 m/s)記録

● 1号機基礎版上	680gal
● 2号機基礎版上	606gal

### 岩盤地中観測記録から岩盤地表の地震動を推定する。

柏崎刈羽1号機付近の地盤構造(東京電力公開資料)





#### 地中観測記録から地表地震動を推定する手続きーその2-

理論伝達関数は、1次元構造を仮定して上昇波と下降波のみを考慮したものであるが、実際の伝達関数は3次元構造により上昇波や下降波以外の 波の影響を受けていると考えられる。

本検討では,観測記録から得られる伝達関数をより忠実に再現するためにある一定のノイズを理論伝達関数に考慮する。

$$\widetilde{T}(f) = \frac{\widetilde{E}(f) + \widetilde{F}(f)}{2\widetilde{E}o(f)} + T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$

$$T\widetilde{N}(f)$$





### 地中と地表観測のスペクトル比から推定された地盤構造

	層厚	S波速度	Q値
1層	6.0m	170m/s	10
2層	14.0m	320m/s	10
3層	17.5m	500m/s	20
3層	-	500m/s	20

### 地中記録から地表に戻した地震動波形



### 地中観測記録から地表地震動を推定する手続きーその4-



### 表層による地震動の増幅特性



表層による地震動の増幅特性  $\tilde{G}(f)$   $\tilde{G}(f) = \frac{2\tilde{E}o(f)}{\tilde{E}(f)} + G\tilde{N}(f)$ ここで  $G\tilde{N}(f)$ は伝達関数に含まれるノイズ、 第2項は第1項に比べて小さいと仮定して、表層 のはぎとりを行う。

岩盤地表の地震動

$$\widetilde{A}_{R}(f) = 2\widetilde{A}s(f) \cdot \frac{1}{\widetilde{G}(f)}$$

### 地中観測記録から地表地震動を推定する手続きーその5-

地表(未固結地盤)地震動(計算値)から500m/s層(岩盤)表面地震動に戻す。





**岩盤上の最大加速度の距離減衰式**(左図の青線) と地中観測記録から推定された岩盤地表の最大加 速度(●)の比較

> 500m/sの地中観測点の記録の最大加速 度と,500m/s地表における最大加速度の 比は,1.5倍(NSとEWの平均)であった.

> そこで,K-NETの岩盤相当の観測点の最 大加速度と1号機地中記録を1.5倍した最 大加速度の距離減衰を比較

北西傾斜と南東傾斜の断層モデルは国土地理院のものを使用

- ○1号機地中記録の最大加速度
- 1号機500m/s層表面の地震動
   の最大加速度

# 経験的応答スペクトルとの比較

•基準となる応答スペクトルは Abrahamson and Silva (1997)で与えられる。

•観測記録の応答スペクトルは適切な震源断層を設定し、断層最短距離の関数として与えられる。

•観測による応答スペクトルと基準応答スペクトルの比 を求める。

### Abrahamson and Silva (1997)の距離減衰式



## 近年発生した国内の内陸地震への適用

1) K-NET およびKiK-netの地表観測記録を利用。

- 2) 表層20m以内でVs>600m/s程度になるものは「岩盤 (S=0)」, それ以外は「堆積層(S=1)」とする。
- 3) 震源インバージョン解析のモデルを用いて,断層最短 距離を設定。
- 4)同解析結果より,モーメント・マグニチュードを設定。
- 5)断層最短距離で30km以内のサイトを対象。

# 地表断層地震と地中断層地震の地震動

### 地表断層を伴う大地震

長周期の地震動は経験的な 平均特性よりも大きいが, 短周期では小さい。

#### 地表断層を伴う地震

周期1秒付近の地震動 が経験的な平均特性よ りも小さい。



周期1秒付近の地震動 が経験的な平均特性よ りも大きい。



## 2007年新潟県中越沖地震



防災科研による,ふたつの断層面

### 2007年新潟県中越沖地震

非線形応答の影響が大きい,K-NET柏崎(NIG018)は含まず



断層モデルA(北西傾斜) 断層モデルB(南東傾斜)

防災科研による、ふたつの断層面で評価

全周期でほぼ平均的 1秒付近がやや落ち込む傾向はやや「地表断層」的

### 2004年新潟県中越地震



全周期で大きく「地中断層」的と言えるが, 1秒付近が落ち込む傾向は「地表断層」的

### 2007年能登半島地震



全周期で大きく,1秒付近の傾向は 「地中断層」的





短周期が大きいが,1秒付近は「地表断層」的

### 2005年福岡県西方沖地震

断層最短距離は50km以内



短周期が大きいが,1秒付近は「地表断層」的

- ・中越沖地震により生成された強震動の応答スペクトルはこれまでの経験的距離 減衰式とほぼ同レベルである。
- しかしながら、震源域に近い柏崎刈羽原発の地震動は顕著に大きい。

### 考えられる原因

- 1.破壊の指向性効果など震源の性質による
- 2. 敷地近傍の地盤による

# 3. 強震動記録から推定される断層破壊過程

- 経験的グリーン関数法を用いて、フォーワード・モデリングによる震源断層のモデル 化を検討する。
- ・ 震源断層は南東傾斜か北西傾斜かの決着はついていないが、予備的解析の結果 刈羽村から柏崎市にかけた沿岸地域の大きな強震動および強震動記録に顕著に 見られるパルス波形を説明するためには、北西傾斜の震源断層の可能性が示唆さ れた。
- しかしながら、佐渡側の強震動観測点における強震動記録を説明するためには、
   南東傾斜の分岐断層の存在の可能性も否定できない。
- ここでは、北西傾斜の震源断層を仮定して震源のモデル化を行った。
   その結果、3つのアスペリティをもつ特性化震源モデルを用いて、西山町、刈羽村、 柏崎市など震源近傍域のみならず広域の強震動記録を再現できることがわかった。
   しかしながら、佐渡側の観測点の強震動は過小評価となる。
- 柏崎刈羽原発において顕著に大きい地震動が記録されたのは、柏崎沖約7km、 深さ約7kmにあるアスペリティが海側から陸側に向かって破壊したため、柏崎刈羽 原発の方向にディレクティビティ・パルスが生じたことによる、考えられる。

### 2007年中越沖地震の余震分布(東大地震研HPより)

下左の平面図より走向を,下右の断面図より傾斜角を読み取って 震源断層を設定。



### 経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンによる断層破壊過程



### 経験的グリーン関数を用いた震源インバージョン結果の比較



### 近地波形記録を用いた波形インバージョンによる断層破壊過程





	本震	余震	
発生日時	07/07/16 10:13	07/07/16 21:08	
震源(気象庁)	37.557 , 138.609	37.509 , 138.630	
震源深さ	12km(震研)	20.4km(気象庁)	
Mw	6.6	4.4	
Mo ( F-net )	8.37E+18Nm	5.21E+15Nm	
(str,dip,rake) (F-net)	25/223 51/42 72/111	187/39 54/41 70/115	

### 2007年中越沖地震:震源近傍における速度記録







破壊速度 2.8km/s 小断層 1.3×1.3Km

		破壊開始点	深度
A	\sp1	(2, 4)	12.0km
A	sp2	(1, 3)	13.4km
A	\sp3	(3, 5)	9.2km

Mo(Nm)	L(km) × W	(km)	(MPa)	risetime
8.7 × 10 <sup>17</sup>	5.2 × 5.2	$(N:4 \times 4)$	15.1	0.5
9.0 × 10 <sup>17</sup>	5.2 × 5.2	$(N:4 \times 4)$	15.6	0.6
1.5 × 10 <sup>18</sup>	$6.5 \times 6.5$	$(N:5 \times 5)$	13.3	0.6
	Mo(Nm) 8.7 $\times$ 10 <sup>17</sup> 9.0 $\times$ 10 <sup>17</sup> 1.5 $\times$ 10 <sup>18</sup>	Mo(Nm)L(km) × W $8.7 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ $9.0 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ $1.5 \times 10^{18}$ $6.5 \times 6.5$	Mo(Nm)L(km) × W(km) $8.7 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ (N:4 × 4) $9.0 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ (N:4 × 4) $1.5 \times 10^{18}$ $6.5 \times 6.5$ (N:5 × 5)	Mo(Nm)L(km) × W(km)(MPa) $8.7 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ (N:4 × 4)15.1 $9.0 \times 10^{17}$ $5.2 \times 5.2$ (N:4 × 4)15.6 $1.5 \times 10^{18}$ $6.5 \times 6.5$ (N:5 × 5)13.3

走向	218
傾斜角	45
すべり角	90
基準点緯度	37.5045
基準点緯度 経度	37.5045 138.7301

### K-NET NIG019(小千谷)





### K-NET NIG021(十日町)



K-NET NIG018(柏崎)

#### 柏崎刈羽原子力発電所1号機地下5階(基礎版上)



#### 柏崎刈羽原子力発電所5号機地下4階(基礎版上)



K-NET 観測点における観測波形と合成波形(速度波形)の比較



# 4. 柏崎刈羽で観測されたキラー・パルスは どうしてできたのか?

- 経験的グリーン関数法を用いたフォーワード・モデリングにより、柏崎刈羽原発における強震動記録に顕著に見られる3つのパルス波は北西傾斜の震源断層上の3つのアスペリティによることが明らかになった。
- 強いパルス波は、各アスペリティでのすべり角と破壊進行方向に依存して決まる 指向性効果により生成される。
- アスペリティからの地震動の生成に関して離散化波数法を用いた理論的波形 シミュレーションにより検証を行う。

経験的グリーン関数法を用いて推定された震源断層モデル







KKZ1R2:1号機基礎マット上(地中) KKZ5G1:5号機地震小屋(地表)

KKZ5R2:5号機基礎マット上(地中)

40

40

40

40

# 理論的グリーン関数を用いた震源モデルの改良



Model 1 (Initial): 経験的グリーン関数法を用いて推定された最適モデル Model 2 (Revised): 理論的グリーン関数を用いて検証された改良モデル













# 柏崎刈羽の記録に顕著に見られるアスペリティ 3 からのディレクティ・パルスの吟味

- rake angle
- 地盤構造
- •断層面の破壊伝播パターン

### に関する影響評価

### 柏崎刈羽1号機

#### Rake=70 °

PWI ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PWI. 2700 rk70 PGA(cm/s/s) = 216.0 PGV(cm/s) = 62.9 PGD(cm) = 18.957



PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/Syn / chue. PW1. 2700 rk70 PGA(cm/s/s) = 509.8 PGV(cm/s) = 79.6 PGD(cm) = 26.635



PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW1.2700 rk70 PGA(cm/s/s) = 163.2 PGV(cm/s) = 23.4 PGD(cm) = 4.378



Rake=80 °

PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PW1. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 216.0 PGV(cm/s) = 62.9 PGD(cm) = 18.957



PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chue. PW1. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 509.8 PGV(cm/s) = 79.6 PGD(cm) = 26.635



PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW1. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 163.2 PGV(cm/s) = 23.4 PGD(cm) = 4.378



#### Rake=90°

PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PW1. 2700 rk90 PGA(cm/s/s) = 216.0 PGV(cm/s) = 62.9 PGD(cm) = 18.957



PWI ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chue. PWI. 2700 rk90 PGA(cm/s/s) = 509.8 PGV(cm/s) = 79.6 PGD(cm) = 26.635



PW1 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW1.2700rk90 PGA(cm/s/s) = 163.2 PGV(cm/s) = 23.4 PGD(cm) = 4.378



### 柏崎刈羽5号機

#### Rake=70 °

PW5 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PW5. 2700 rk70 PGA(cm/s/s) = 200.7 PGV(cm/s) = 50.2 PGD(cm) = 18.171



PW5 ... / Dchu\_2007 fwd5/Syn/chue.PW5.2700 rk70 PGA(cm/s/s) = 277.3 PGV(cm/s) = 53.1 PGD(cm) = 16.457



 PW5
 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW5. 2700 rk70

 PGA(cm/s/s) = 69.4
 PGV(cm/s) = 13.8

 PGD(cm) = 4.195



#### Rake=80 °

PW5 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PW5. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 200.7 PGV(cm/s) = 50.2 PGD(cm) = 18.171



PW5 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chue. PW5. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 277.3 PGV(cm/s) = 53.1 PGD(cm) = 16.457



 PW5
 .../Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW5.2700 mod2

 PGA(cm/s/s) =
 69.4
 PGV(cm/s) =
 13.8

 PGD(cm) =
 4.195



#### Rake=90°

PW5 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chun. PW5. 2700 r k90 PGA(cm/s/s) = 200.7 PGV(cm/s) = 50.2 PGD(cm) = 18.171



 PW5
 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chue. PW5. 2700 rk90

 PGA(cm/s/s) =
 277.3
 PGV(cm/s) =
 53.1

 PGD(cm) =
 16.457



 PW5
 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn/chuu. PW5. 2700 rk90

 PGA(cm/s/s) = 69.4
 PGV(cm/s) = 13.8

 PGD(cm) = 4.195



# NS成分における1号機と2号機の振幅の違いについて





DU5 ... / Dchu\_2007 fwd5/ Syn / chun. DU5. 2700 mod2 PGA(cm/s/s) = 200.7 PGV(cm/s) = 50.2 PGD(cm) = 18.171



# 柏崎刈羽1号機(PW1)へのディレクティビティ・パルス



柏崎刈羽1号機におけるディレクティビティ効果



### 理論的グリーン関数を用いた柏崎刈羽の強震動の検証結果

- ・震源域に近い柏崎刈羽で地震動が顕著に大きくなったのは、 柏崎刈羽に近い震源断層面内にアスペリティの破壊が海側から 陸側に向かって進行し、柏崎刈羽が強い指向性パルスに直撃 されたため、と考えられる。
- rake angleは、1R2(1号機の基礎マット)では90°, 5R2(1号機の基礎 マット)では70°が最適となる。ここでは80°を採用する。
- アスペリティ3からのディレクティビティ・パルスが1号機側で大きく 5号機側で小さくなるのは、地盤構造の違いよりもアスペリティ3 からの放射特性の影響の方が大きい。
- 断層面での破壊パターンは、破壊開始点から同心円状に広がる モデルよりも、各アスペリティごとに破壊開始点をもつ多重震源 モデルの方が波形をよりよく説明できる。

中間的なまとめーその1

- 1.2007年中越沖地震はどんな地震?
  - ・この地震は日本海東縁部のひずみ集中帯と呼ばれる活構造地域に発生。
  - ·震源域の周辺には北東から南西方向に平行に走る活断層(活褶曲)が 多数存在する。
  - ・本震の発震機構は北西-南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型。
  - ・しかし、震源断層が南東傾斜であるか北西傾斜であるかは、余震分布、 地殻変動データ、遠地の地震波形データおよび津波データの解析結果 からは特定できていない(平成19年8月8日地震調査委員会の評価文)。
- 2. 地震動は大きかったのか?
  - ・観測された強震動の最大加速度は、震源域に近いと考えられる柏崎刈羽 原発の記録を除くと、これまでに得られている距離減衰式(司・翠川,1999; 福島・田中,1990)とほぼ一致している。
  - ・応答スペクトルは過去の同規模(Mw 6.6) の地震の平均的なレベルとなる。 応答スペクトルの形状は地表断層的になっている。

中間的なまとめーその2

- 3. 強震動記録からみた震源モデル
  - 経験的グリーン関数を用いた断層破壊過程のフォーワード・モデリングでは、
     北西傾斜の震源断層に3つのアスペリティを設定したモデルが震源域近傍の
     観測記録をよく説明することがわかった。計算された強震動と観測との比較から、柏崎直下に設定されたアスペリティ3の破壊が海側から陸域に走ったと考えられる。
- 4. 柏崎刈羽原子力発電所を襲ったキラー・パルス
  - ・柏崎刈羽原発の地下5階で観測された強震動波形は3つの顕著なパルス波 をもつ。
  - ・これらのパルス波がなぜ生じたかを解明するため、Bouchon(1981)による離散 化波数法を用いて3つのアスペリティから生成され柏崎刈羽に到達した地震 動の理論計算を行い、観測と計算の比較を行った。南東上がりの震源断層 面にある3つのアスペリティから地震動は指向性効果によりパルス的な形状 を持つことが示された。
  - ・このような破壊伝播方向に生じるディレクティビティ・パルス波は1995年阪神・ 淡路大震災のときに構造物の破壊を引き起こすキラーパルスと同様のもの と考えられる。

中間的なまとめーその2

- 5.今後の基準地震動の評価について
  - ・今回の地震の強震動はひずみ集中域近傍域に位置する原発サイトにおける基準地震動の評価の在り方に極めて教訓的なものと考える。
  - ·今回の地震の震源断層は、余震分布や地殻変動データからは南東落ち か北西落ちか決まっていないが、震源近傍の強震動記録からは北西落ち が有力である。
  - ・今後の基準地震動の評価を考えるには、ひずみ集中帯の地表に見られる 活断層あるいは活褶曲の形状と地中の震源断層との関係について、更な る研究が必要とされる。
  - ・今回の地震と同様に歪み集中帯に発生した2004年中越地震の震源断層 面の推定に適用された「地表の地質構造やボーリングなどの地質構造 データから「バランス断面法(岡村・柳沢,2004)」などで地下断層形状を 推定する手法の早急な実用化が望まれる。
  - ・今回の地震の震源断層は、南東傾斜の場合新潟県中越沖にある海底断層 に関係し、北西傾斜の場合、長岡平野西縁断層帯の深部延長上の断層と 関係している可能性があることが指摘されている(地震調査推進本部地震 調査委員会2007年8月8日)
  - ・原子力発電所の耐震設計の観点からは、このような地域の基準地震動 策定に当たっては南東傾斜と北西傾斜の互いに共役な2つの断層を想定 した評価が必要。

謝辞

ここでは(独)防災科学技術研究所によるK-NETの観測記録を使用させて いただきました。また,東京電力株式会社による柏崎・刈羽原子力発電所の 観測記録を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。