

4 2007年新潟県中越沖地震の震源モデルの構築

倉橋奨・正木和明・入倉孝次郎

1. はじめに

2007年7月16日10時13分、柏崎市沖約10kmを震源とする新潟県中越沖地震(Mj6.8)が発生した。この地震では、震源近傍の柏崎市、出雲崎町および震源から約50km離れた長野県飯綱町で震度6強が観測され、人的被害は死者15人、住家被害は全壊1259棟、半壊5487棟(消防庁、2007)が報告されている。特に、震度6強を観測した地域にあった柏崎刈羽原子力発電所(以下柏崎刈羽原発とする)内における5号機地表の最大加速度は1200galを超え、さらに1号機の基礎盤(S波速度700m/sの層)における最大加速度は993galという非常に大きな地震動が観測された。このような大きな揺れを発生させた要因、特に震源の特性を解明することは今後の強震動予測のために重要な意味を持つ。本研究では、経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションにより、この地震のモデル化を行った。

2. 新潟県中越沖地震の観測記録の特徴

本震の震源近傍では特徴的な観測記録が得られている。1つ目として、最大加速度と距離減衰式との関係が挙げられる。図1(右)に、K-NETで観測された加速度記録(□)と経験的な距離減衰式(実線(司・翠川、1999))の比較図を示す。加速度観測記録は距離減衰式とよく整合しており、この地震が特別な特徴を持ったものではなく、過去に発生した同規模の地震と同様な地震であったといえる。しかしながら、震源近傍である柏崎刈羽原発の観測記録は距離減衰式よりも顕著に大きく、局所的には大きな地震動が到達されたことを意味する。

2つ目は、震源近傍の観測点の記録において、2~3個の明瞭なパルス波がみられることである。図2に、柏崎刈羽原発の1号機の基礎盤上の記録とK-NETのNIG018(柏崎)、NIG019(小千谷)、NIG021(十日町)、NIG025(直江津)の速度記録を示す。このパルスは、本震の震源断層にパルスを放出したアスペリティが存在していることを示唆している。

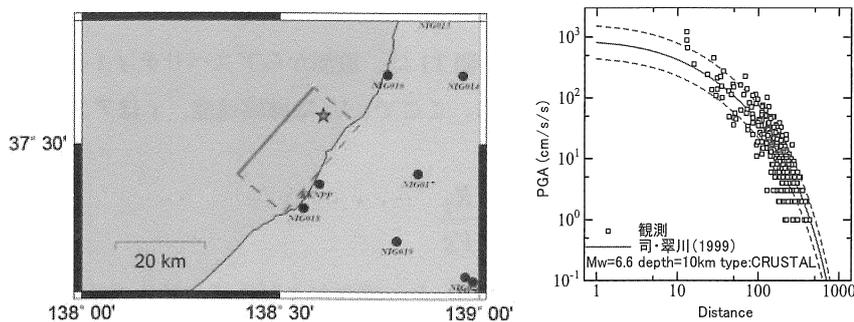


図1 本震の最大加速度と司・翠川(1999)による経験的な距離減衰式との比較(右)。使用したモデルは堀川(2007)(右)とした。

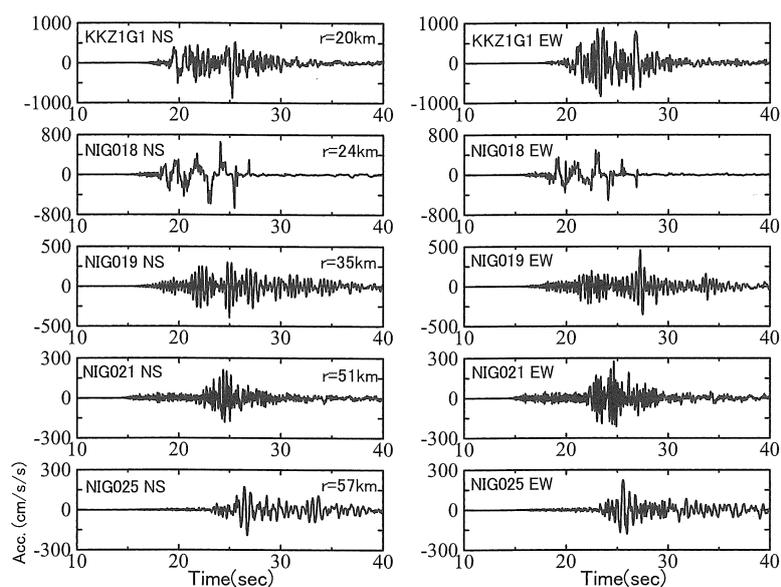


図2 柏崎刈羽原発1号機の基礎マット盤 (KKZ1R2)、NIG018 (柏崎)、NIG019 (小千谷)、NIG021 (十日町) および NIG025 (直江津) における本震の観測記録の速度波形。観測記録は、上から震源距離の近い順に示している。

3. パルスの時間差によるアスペリティの位置の推定

本震の観測記録で観測されている顕著なパルスは、震源の不均質な部分、すなわちアスペリティにより生成されたものと考えられる。ここでは、S波初動到達時刻と顕著なパルスの到来時間差からアスペリティの位置を推定した。

図3は、震源、アスペリティ1 (ASP 1) の位置および観測点 (KKZ1R) の模式図と、KKZ1R2で観測された地震動波形を示している。震源から放射されたS波の到達時間 T_0 は、震源距離 R_1 と平均S波速度 V_s により計算される。

$$T_0 = \frac{R_1}{V_s} \quad \dots (1)$$

一方で、アスペリティ1から放射されたS波の到達時間 T_1 は、震源からアスペリティ1への破壊時間とアスペリティ1から観測点までのS波伝播時間で計算される。ここで、 V_r は破壊速度、 r はアスペリティ1とアスペリティ2の距離を示す。

$$T_1 = \frac{r}{V_r} + \frac{R_2}{V_s} \quad \dots (2)$$

観測記録から読み取ることができる時間差 ($T_1 - T_0$) と、震源および任意のアスペリティ1の位置から発生したS波到達の時間差の関係から、最適なアスペリティ1の位置が推定される。この方法では、断層面に加えて、S波速度、破壊速度を観測記録から推定しなければならない。ここでは、S波速度を余震のTP-TS時間から、破壊速度はパルス1とパルス2または3の相対的な位置関係から、グリッドサーチにより求めた。図4 (左) に、本手法により推定した本地震のアスペリティ2の位置を、図4 (右) にアスペリティ3の位置を示す。その結果、アスペリティ2は、震源よりも若干沖であり断層面の浅い部分に、アスペリティ3は、柏崎刈羽の西約5kmの位置に推定された。今回は、パルスの最大値で時間差を評価しているため、評価した地点が必ずしも破壊開始点であるとは限らない。しかしながら、この付近にアスペリティが存在していると考えられる。

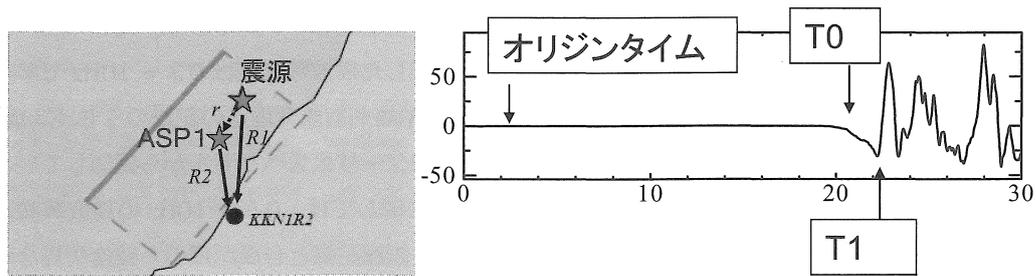


図3 パルスの時間差からアスペリティ位置を推定する方法の模式図

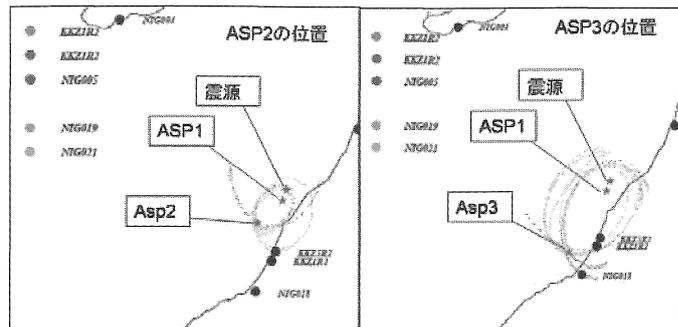


図4 観測波形の時間差から決定したアスペリティ2 (左) とアスペリティ3の位置 (右)

4. 経験的グリーン関数とする余震の選定

柏崎刈羽原発を含めた震源近傍の観測点では、本地震による余震がいくつか観測されている。経験的グリーン関数法は、本震とグリーン関数とする余震の伝播経路およびサイト特性が共通であると仮定して波形を合成する方法であるため、グリーン関数として用いる余震は、本震のアスペリティと同じ地点で発生したものをを用いることが望ましい。実際に、余震の発生位置により、観測波形の振幅が異なることが知られている。柏崎刈羽原発で観測されたいくつかの余震のうち、南北方向に並んで位置する原子炉建屋5号機（最も北側の建屋）から1号機（最も南側の建屋）の観測波形の振幅を比較すると、以下のような結果が得られた。柏崎刈羽原発を基準として概ね北側で発生した余震は1号機よりも5号機の振幅が大きく、南側で発生した地震は1号機の方が大きい。また、1号機と5号機からの距離が同じ地点の余震は、振幅が同じであった。

一方で、柏崎刈羽1号機から5号機の本震の観測記録では、1つ目のパルスは5号機が大きく、3つ目のパルスは1号機の方が大きかった。このことから、3つ目のパルスを生成したアスペリティ3は、柏崎刈羽原発より南側にあることが考えられ、アスペリティ3を解析するためには、南側で発生した余震を使用することが望ましいと考えられる。本研究では、経験的グリーン関数としてアスペリティ1とアスペリティ2の解析には北側で発生した7月16日21:08の余震を、アスペリティ3の解析には南側で発生した8月4日0:16に発生した地震を使用した。

5. 震源モデルと合成波形

5.1 震源モデルの構築

震源近傍の観測波形のパルスから推定した3つのアスペリティの位置を破壊開始点として、試行錯誤により震源の最適モデルを構築した。なお、各アスペリティ内のすべり量は一律と仮定した。背景領域は計算していない。各アスペリティの破壊開始点は、アスペリティごとに異なるマルチハイポセンターモデルとした。各アスペリティのサイズや応力降下量をパラメータとして波形合成を行い、観測波形との一致度から最適なモデルを構築した。

使用した観測点は、KKZ1R2（1号機基礎マット）、KKZ5R2（5号機基礎マット）である。図5（左）に本震ならびに解析に用いた余震の震央位置および観測点を示す。今回使用した周波数範囲は0.3～10Hzである。しかしながら、余震2は地震の規模が小さく低周波の精度がよくない。柏崎刈羽原発地点の記録のうち、NS成分は、低周波域でノイズレベルが観測レベルよりも大きくなっていることをフーリエスペクトルから確認している。そこで、柏崎刈羽原発の1号機、5号機の基礎マット記録のNS成分に関しては、0.5～10Hzの周波数範囲で解析することとした。各アスペリティの大きさや破壊開始点の位置は、観測記録と合成記録の一致度を見ながら試行錯誤で決定した。

5.2 解析結果

図5（右）に本研究で推定した震源モデルを、表1に本震ならびに解析に用いた余震の震源パラメータ、表2に震源モデルのパラメータを示す。各アスペリティの大きさは、 $5.5 \times 5.5\text{km}$ 、 $5.5 \times 5.5\text{km}$ 、 $5.04 \times 5.04\text{km}$ となり、それぞれのアスペリティの大きさはほぼ同じであった。応力降下量は、19～24MPaであった。図6に観測波形と合成波形の比較を示す。

合成波形は、観測波形とよく一致しており、特に、柏崎刈羽原発の1号機と5号機のEW成分に関しては、第1～3パルスの加速度、速度、変位、振幅、位相ともに非常によく一致していることがわかる。また観測記録から、1号機と5号機の第3パルスの振幅は1号機の方が大きいことが示されているが、本研究では、アスペリティの位置により使用した余震を変えていることから、合成波形は1号機と5号機の振幅の関係を満たしている。

表1. 本震と余震の緒元

	Mainshock	Aftershock(AFT1)	Aftershock(AFT2)
Origin time	07/07/16 10:13	07/07/16 21:08	07/08/04 00:16
Hypocenter	37.557, 138.609	37.509, 138.630	37.420, 138.537
Depth	12km	15.6km	13.1km
Mw	6.6	4.4	-
Mo	$8.37\text{E}+16\text{Nm}$	$5.21\text{E}+16\text{Nm}$	$1.56\text{E}+14\text{Nm}$

表2. 震源モデルの緒元

	Rupture start point	Depth (km)	Mo (Nm)
ASP1	(4,3)	12.3	1.69×10^{18}
ASP2	(5,5)	11.0	1.69×10^{18}
ASP3	(4,7)	12.0	1.02×10^{18}
	L (km) × W (km)	$\angle \sigma$ (MPa)	Risetime (second)
ASP1	5.5×5.5 (N:5×5)	23.7	0.5
ASP2	5.5×5.5 (N:5×5)	23.7	0.5
ASP3	5.04×5.04 (N:9×9)	19.8	0.45

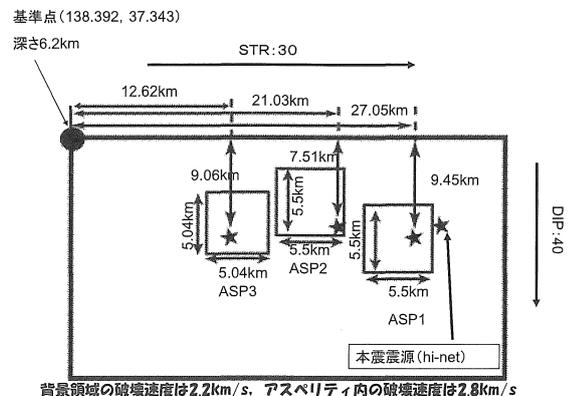
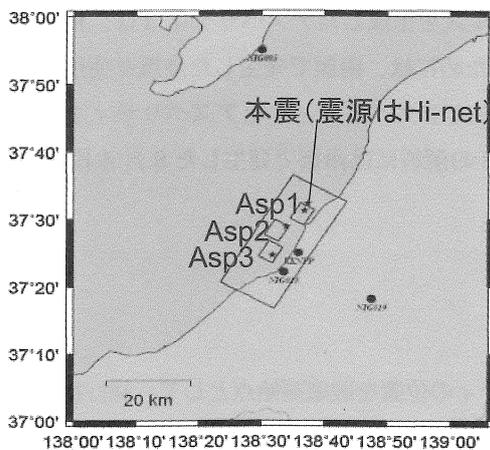


図5 震源モデルと観測点、本震および余震の震央位置（左）と震源モデル（右）

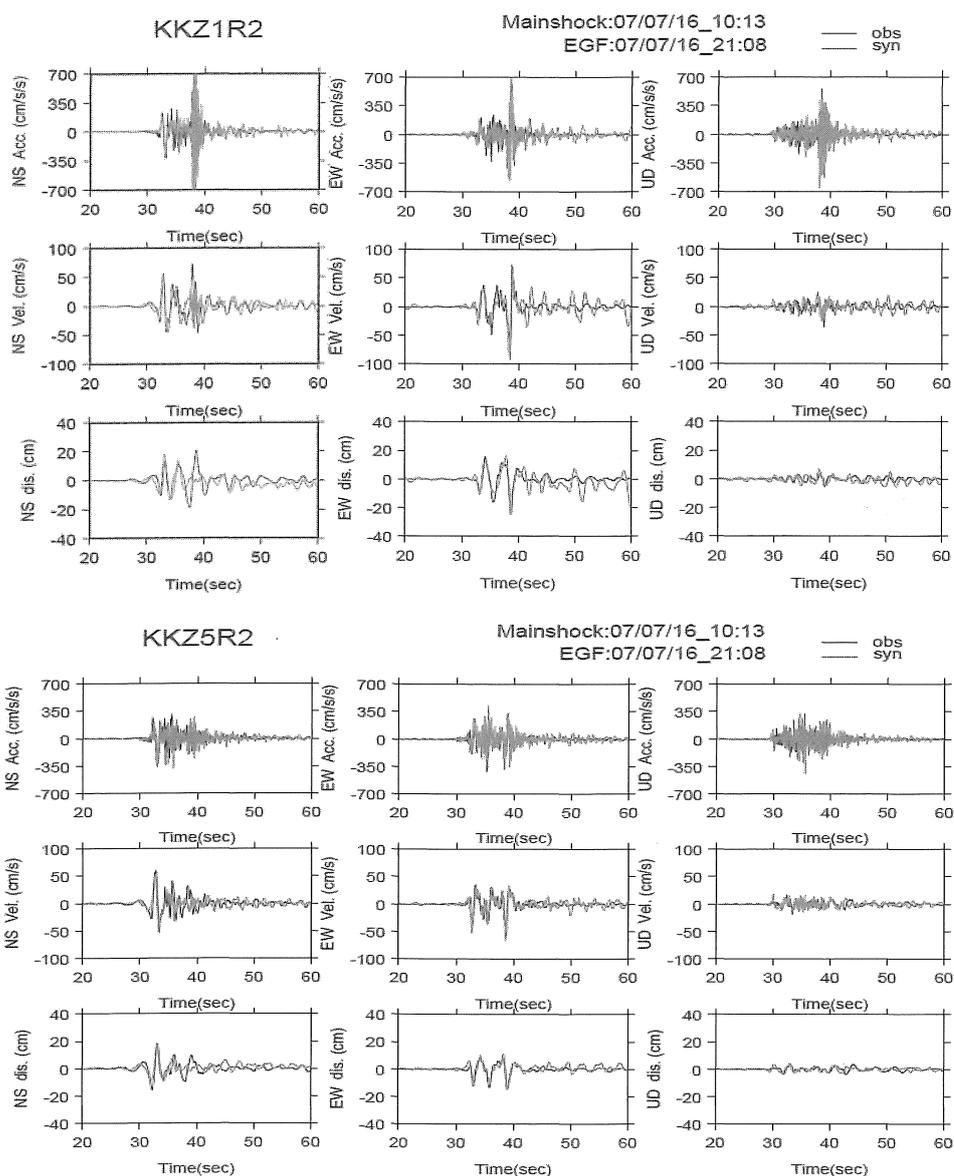


図6 推定した震源モデルによる合成波形（赤線）と観測波形（黒線）の比較。

各観測点の図は、上から加速度、速度、変位波形、左から NS 成分、EW 成分、UD 成分を示す。

6. まとめ

本研究では、新潟県中越沖地震の震源モデルの構築を行った。

- 1) 経験的な距離減衰式と観測記録は、ほぼ整合的で特徴的な地震ではないと考えられる。しかしながら、断層最短距離 10 km 程度の震源からの極近傍観測点である柏崎刈羽原発と K-NET 柏崎の記録は、距離減衰式より大きく、局所的な強震動が到達した可能性が示唆された。
- 2) 本地震の観測記録には震源の破壊過程を示す特徴的なパルスが観測されており、そのパルスの時間差からアスペリティの位置を決定し、経験的グリーン関数法により震源モデルを構築した。
- 3) 推定した震源モデルから計算した合成波形は観測波形とよく一致しており、各アスペリティとも約 5×5 km の断層面積であり、応力降下量は 20 ~ 25 MPa であった。