

3 広帯域の強震動評価のための2007年能登半島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3月25日9時41分58秒(JST)に、能登半島西沖において能登半島地震が発生した。この地震の規模を示すマグニチュードはMj6.8、地震モーメントはMw6.7であった。最大震度は、輪島市、穴水市、七尾市で震度6強が観測され、広い範囲で震度5弱以上の大きな震度が観測された。この地震における死亡者は1人、建物の全壊棟数は300棟、半壊棟数は2000棟に達した(消防庁、2007)。

この地震によるCMT解は、走向:58°、傾斜角:66°、すべり角:132°(NIED、2007)、余震分布は、長さ25~30km、幅10~15km(東大地震研究所、2007)と推定されている。さらにこの付近では、片川ほか(2005)により活断層の存在が知られており、断層傾斜角はCMT解や余震分布による傾斜角と整合的であった。

地殻内で発生する巨大地震における広帯域の強震動を計算するためには、対象となる地震の震源モデルが必要となる。その震源モデルの構築方法のひとつとして、特性化震源モデルに基づいて経験的グリーン関数法により計算された合成波形と、震源近傍で観測された観測波形との比較から推定する方法があり、その手法の有効性は既往の研究により示されている(例えば、釜江・入倉1998;三宅ほか,2003)。彼らは先行の論文で、強震動が生成される部分(強震動生成域)と、すべり量が大きい部分(アスペリティ)とが近似することを示している。強震動予測と将来発生する巨大地震との危険度の評価を示すことは重要であることから、本研究では、能登半島地震における上記の関係性について検証を試みた。

2. 観測記録

本研究では、能登半島に設置されているK-NET(NIED)の6観測点を対象とした。この6地点は、もっとも震源近傍に位置するISK006を含めた、破壊の進行方向にあたる能登半島北方の観測点である。図1にK-NET観測点の位置と、本震ならびに解析に用いた2つの余震の震央を示す。本震と余震の地震モーメントと震源メカニズムは、F-netの値を用いた(NIED)。それぞれの余震の震源断層面積は、余震の観測記録を用いて計算した震源スペクトルから求めた。また余震の応力降下量は、地震モーメントと断層面積との関係から計算した。これらの震源パラメータは、表1に示している。本研究における解析周波数は、0.2~10Hzとした。

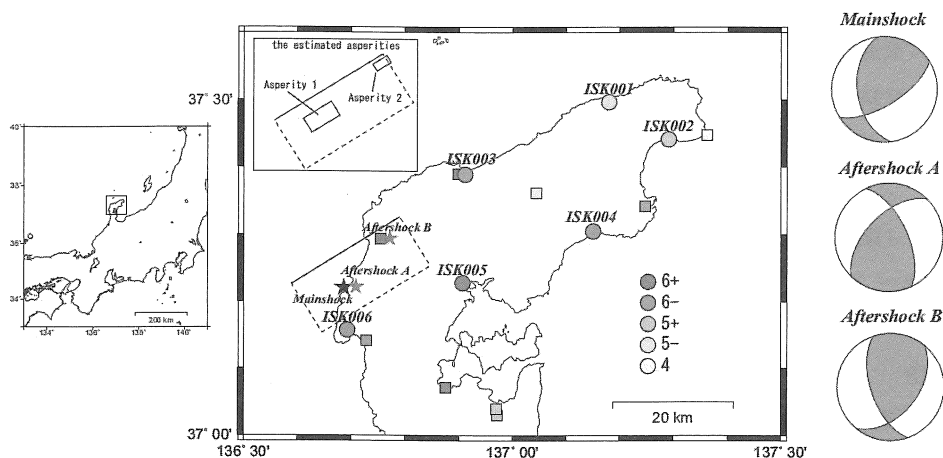


図1 本研究の解析に用いた観測点(丸)、解析に使用しなかった観測点(四角)と本震と経験的グリーン関数に使用した余震の震央位置。図中の色分布は、JMA震度階を示す。また、右図には本震と経験的グリーン関数に用いた余震の震源メカニズム(f-net)を示す。

表1 能登半島地震の本震と Aftershock A と Aftershock B の震源パラメータ。Aftershock A と B の断層面積と応力降下量は、グリッドサーチを行う前のものと後のものを示している。

	Mainshock	Aftershock A	Aftershock B
Origin time (JST)	2007/3/25 09:42	2007/3/28 08:08	2007/3/25 15:43
Latitude (°)*	37.221	37.222	37.294
Longitude (°)*	136.686	136.709	136.772
Depth (km)*	10.7	13.3	8.9
M_w **	6.6	4.6	4.0
Strike (°)**	58/173	335/225	161/40
Dip (°)**	66/48	62/56	60/48
Rake (°)**	132/34	39/146	51/137
Seismic moment (N*m)**	1.36×10^{19}	1.03×10^{16}	1.25×10^{15}
Fault area (km ²) (before the grid search)	—	2.2	1.0
Stress drop (MPa) (before the grid search)	—	7.6	3.0
Fault area (km ²) (after the grid search)	—	—	0.81
Stress drop (MPa) (after search model)	—	—	4.1

*estimated by JMA, **estimated by F-net.

3. 経験的グリーン関数の選択方法

能登半島地震では、この震源域内においていくつかの余震が発生している。経験的グリーン関数法で高精度な強震動を予測するためには、グリーン関数となる余震を選択する必要がある。選択する際の要素としては、以下のことが挙げられる。

- 1) 余震の震源は、本震のアスペリティの近傍であること
- 2) 余震の放射特性は、本震の放射特性と近似していること

1) に関しては、経験的グリーン関数法は「本震と余震の伝播経路特性とサイト特性は近似している」という仮定で成立していることから必要な事項である。2) は、余震の震源メカニズムは本震のメカニズムと同じか似ている必要があるためである。以上の要素から、本地震の解析に用いられるグリーン関数としてふさわしい余震は、2007年3月28日の8:08に発生した地震と3月25日15:43に発生した地震が挙げられる。ここでは、便宜的に最初の地震を Aftershock A、次の地震を Aftershock B とする。Aftershock A の震源位置は、本震とほぼ同じであり、条件 1) が満足されているが、メカニズムは本震と異なっている。一方、Aftershock B は、メカニズムは本震と似ており、条件 2) は満足しているものの、本震の震源と離れている。このことから、2つの地震の放射特性の寄与を観測震源スペクトルから計算して観測点ごとに妥当な余震を選択した。その結果、ISK001、ISK002、ISK003、ISK006 は Aftershock B を、ISK004、ISK005 は Aftershock A を使用することとした。

4. 震源モデルと合成波形の解析手順

本地震の震源モデルは、遠地実体波や近地観測波を用いた波形インバージョンにより評価されている（青井・関口、2007；堀川,2007；Yamanaka, 2007）。これらのモデルの多くは、1 Hz よりも低周波の記録が利用されている。しかしながら、工学的に必要な 0.1 ~ 10Hz の周波数帯における評価が重要であり、本研究においてもそこを目的としている。ここでは、広帯域における震源モデルの構築するための解析手順を以下に示す。

- 1 はじめに、断層分割数 N と応力降下量比 C を計算する。これらは、対象地震と余震の変位観測スペクトルの低周波の比 CN^3 、加速度スペクトルにおける高周波のレベル比を CN と関係づけられ、これらの比から N と C を計算することが可能である。一般的に、解析では本震の震源面積を $N \times N$ のメッシュで区切り、その一つが小地震の面積となる。 N と C の値以外は、経験的な情報から初期値を与える。

- 2 アスペリティの面積と個数を推定する。アスペリティを一つとする場合は、前項で算出した N と C が使用される。面積は断層の分割数 N と小地震の断層の大きさの積で表される。複数のアスペリティを設定する場合は、試行錯誤で分配する。
- 3 観測波と合成波の整合性を評価するため、Miyake et al. (1997) の fitting function を用いた。この観測波と合成波の整合性は変位波形と加速度の包絡形状の残差で評価される。グリッドサーチのパラメータは、破壊速度と小地震のメッシュサイズとした。最適モデルは、fitting 関数の最小の値を持ったモデルである。

次に、グリッドサーチにより最適モデルの構築を行った。特性化震源モデルを用いて計算される合成波は、2つのパラメータの影響を大きく受ける。その2つのパラメータは、アスペリティの面積と応力降下量である。アスペリティの面積は、断層の分割数の N^2 と小地震の面積と一致するメッシュサイズの積である。一つの観測点では、観測波形と合成波形のフィッティングは、アスペリティサイズと破壊速度とのトレードオフである。アスペリティの応力降下量は、応力降下量比と小地震の応力降下量で評価される。小地震の応力降下量は、余震の地震モーメントと断層面積で評価される。それゆえ本研究では、アスペリティの面積、破壊速度と応力降下量を、Aftershock B を用いて ISK001、ISK002、ISK003、ISK006 の観測点において求めた。

5. 解析結果

今回、震源モデルを構築するにあたり、堀川 (2007) によるすべり量分布を参考にアスペリティの位置を推定することとした。堀川 (2007) は、近地地震動記録を用いた波形インバージョンにより、すべり分布を構築している。ただし、1 Hz 以下の低周波のみを用いたモデルである。

本研究による最適震源モデルを図 2 に、震源パラメータを表 2 にまとめて示す。解析の結果、本震の地震モーメントと応力降下量は $2.70 \times 10^{18} \text{Nm}$ 、25.8MPa となった。アスペリティの位置は、堀川 (2007) のすべりの大きい位置と概ね整合的であった。ISK001、ISK002、ISK003、ISK006 における合成波形と観測波形の比較図を図 3 に示す。速度や変位のパルスはよく評価されている。

一方 ISK003 では、2つ目のパルスが評価なされていないことがわかる。これは、ISK003 において、1つのアスペリティのみでは観測されている2つ目のパルスを表現できないことを示している。しかし、ISK003 でみられる2つ目のパルスは、他の地点では明瞭に見られない。このことから、2つ目のアスペリティは ISK003 の近い位置に存在していると考えられる。このことから、1つ目のアスペリティに加えて、ISK003 の近い位置に新たにアスペリティを設定した。2つ目のアスペリティの最適モデルを構築する際、アスペリティ1をそのままにして、2つ目のアスペリティのみを設定した。破壊過程はマルチハイポセンターモデルを採用した。その結果のアスペリティ位置を図 2 に示す。アスペリティ2の位置は、震源から 12km 北東に位置しており、アスペリティサイズ、地震モーメント、応力降下量は 13km^2 、 $2.0 \times 10^{17} \text{Nm}$ 、10.3MPa であった。ISK001 と ISK003 における合成波形と観測波形の比較を図 4 に示す。ISK003 では、速度波形のパルスがよく一致している。さらに図 5 には、ここで構築した震源モデルにおいて、経験的グリーン関数として Aftershock A および Aftershock B を用いた ISK004、ISK005 における観測波形と合成波形を示す。ISK004、ISK005 とも、位相に関しては完全に再現されていないが、振幅に関しては Aftershock B よりも Aftershock A の方が再現性がよく、経験的グリーン関数としての余震の選択は重要な要素といえる。

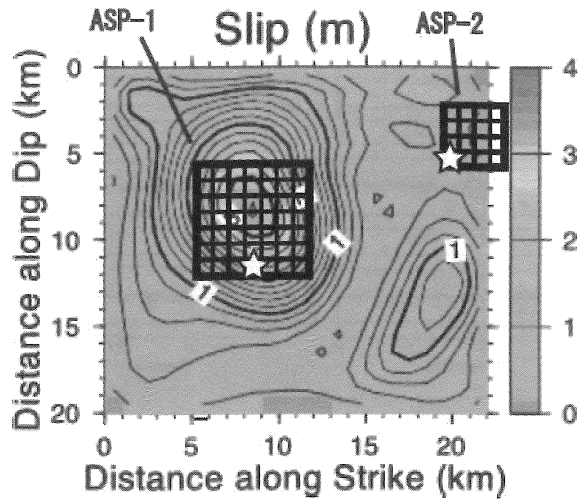


表2 本研究で評価した各アスペリティの震源パラメータ

	M_0 (N*m)	L (km) × W (km)	$\Delta\sigma$ (MPa)
Asperity-1	2.7×10^{18}	6.3×6.3	25.8
Asperity-2	2.0×10^{17}	3.6×3.6	10.3

図2 経験的グリーン関数法によるフォワードモデリングから推定した2つのアスペリティの震源モデル。本研究のアスペリティモデルは、近地強震動記録の波形インバージョンによるすべり分布（堀川、2007）のモデルと整合的である。図中の星印は破壊開始点を示す。

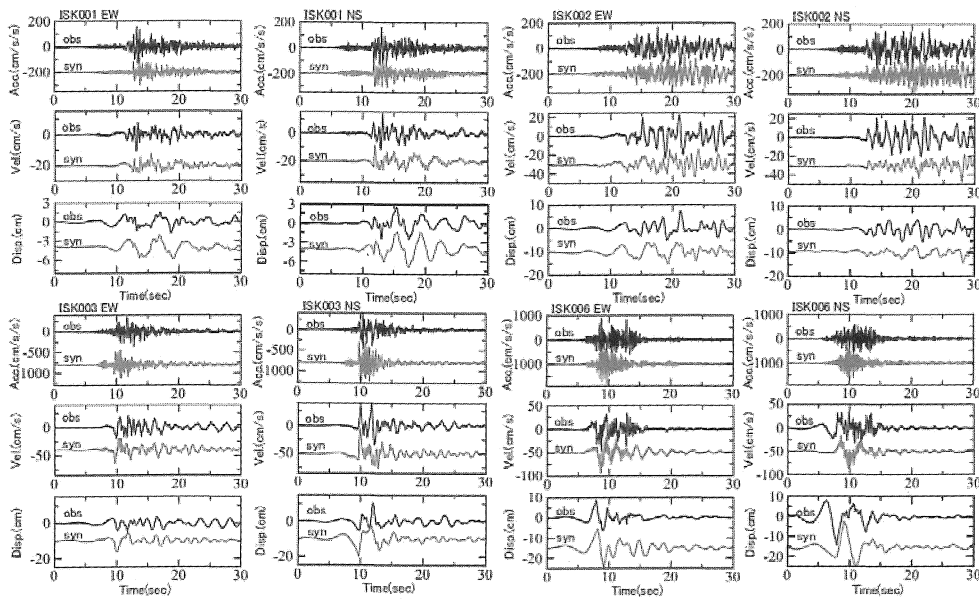


図3 ISK001、ISK002、ISK003、ISK006における観測記録と合成波形の比較。合成波形は、1つのアスペリティにより計算されたものである。

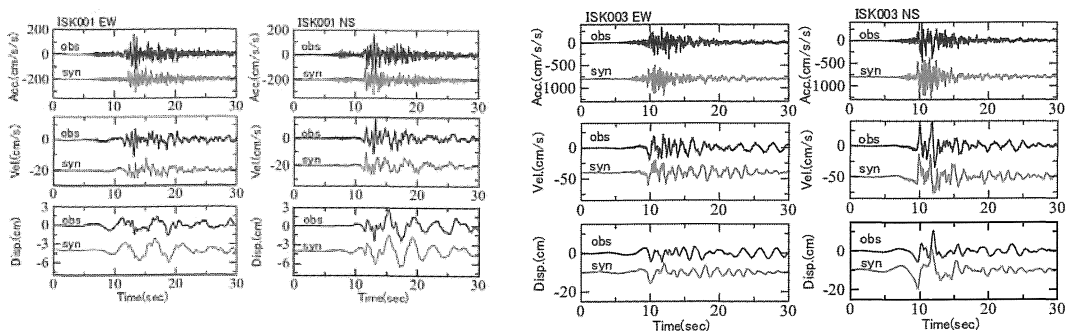


図4 ISK001、ISK003における観測記録と合成波形の比較。合成波形は、2つのアスペリティにより計算されたものである。

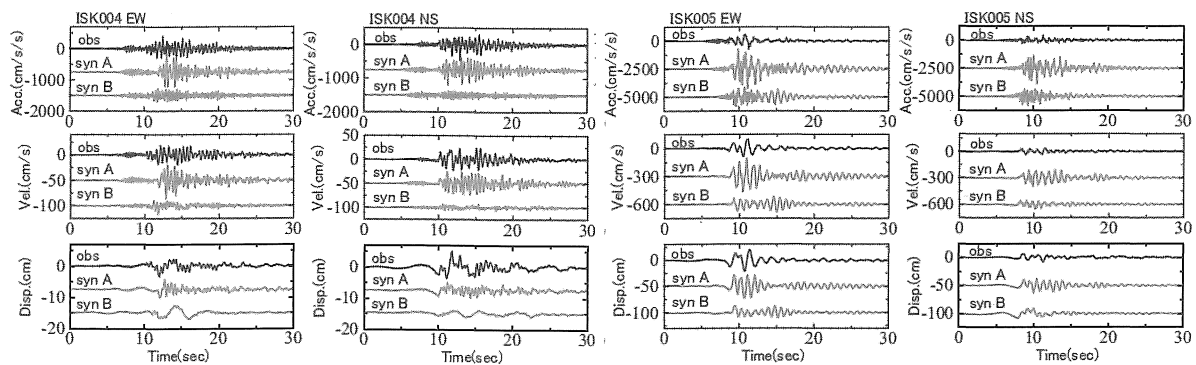


図5 ISK004、ISK005における観測記録と合成波形の比較。合成波形は、Single asperity modelから計算されたものである。図中のSyn AとSyn Bは、それぞれAftershock AとAftershock Bを経験的グリーン関数として用いた合成波形を示す。

6. まとめ

本研究では、堀川（2007）によるアスペリティモデルと経験的グリーン関数法で評価した強震動生成域の関係性について検証を試みた。堀川（2007）によるすべり量の大きい場所と本研究で構築した強震動生成域はほぼ同じ場所あり、能登半島地震は、すべり量の大きい場所で強震動が生成されたことが明らかとなった。また、経験的グリーン関数法による強震動予測を行うためには、経験的グリーン関数となる余震を選択することが重要な要素であることを示された。

参考文献

- 青井真, 関口春子, 近地地震動記録による能登半島地震の震源インバージョン (暫定版), <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/noto070325/>, 2007.
- 片川秀基, 浜田昌明, 吉田進, 廉澤宏, 三橋明, 河野芳輝, 衣笠善博, 能登半島西方海域の新第三紀～第四紀地質構造形成, 地質雑誌, 114, 5, 791-810, 2005
- Kamae, K. and K. Irikura, Source model of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and simulation of near-source ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 400-415, 1998.
- 消防庁, 平成19年(2007年)能登半島地震(第48報)2, <http://www.fdma.go.jp/detail/710.html>, 2007.
- 東京大学地震研究所, 2007年能登半島地震, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/noto20070325/yochiren/coco.html>.
- 防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網, <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>, 2007.
- 堀川晴央, 2007年能登半島地震の破壊過程(第二報), <http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/notohanto/hakaikatei2.html>, 2007
- 三宅弘恵, 岩田智孝, 入倉孝次郎, 経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日(Mjma6.5)及び5月13日(Mjma6.3)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震第2輯, 51, 431-442, 1999.
- 山中佳子, EIC地震学ノート, 185, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/seismo/Note/2007/EIC185.html>, 2007