

# 理論的グリーン関数を用いた宮城県北部地震の震源モデルの構築

齋藤 悠輔

## 1. 研究の目的

2003年7月26日(土)宮城県北部で0時13分、7時13分、16時56分に立て続けに震度6弱、6強、6弱を観測する地震が発生した。それぞれの気象庁マグニチュード( $M_j$ )は5.5、6.2、5.3である。地震の発生の状況から、これらの地震活動は7時13分の地震を本震とする前震-本震-余震型と考えられている。ごく狭い領域(だいたい震源から20km四方より内側)で強い地震動を観測し、3つの地震あわせて木造建物の全壊が1000棟を超えるという大きな被害を出した。しかしその領域から離れたところでは被害は激減している。本研究ではその原因を探求するために本震と考えられている7時13分の地震の震源のモデル化を理論的グリーン関数をあらかじめ位置を特定したアスペリティモデルを用いて行った。

地震動は震源から放出される地震波の特性、震源から観測点の基盤にいたる伝播経路の特性、および基盤より浅い局所的な表層地盤の特性、の3つの性質で表され、それぞれ「震源特性」、「伝播特性」、「地盤特性」と呼ばれている。地震動の再現あるいは予測を行う場合、これら3つの特性を精度良く評価する必要があるが、評価の方法には大きく分けて以下の3つがある。

- (1) 理論的方法
- (2) 経験的方法
- (3) 半経験的方法

理論的方法は、「震源特性」、「伝播特性」、「地盤特性」をすべて実際に則した物理モデルで表現して、理論的に地震動を計算する方法である。この方法では、震源特性は「震源モデル」により、伝播特性と地盤特性は解析的あるいは数値的に求めた「グリーン関数」により表現される。ここに、グリーン関数とは、断層のある点において微少な力を瞬時に作用させたときの(単位インパルス力)、地震動を求めたい地点におけるゆれのことである。一方、経験的方法は、多数の地震記録を統計処理して、マグニチュードや震源距離などをパラメータとする簡便な式(距離減衰式)を用いて、上記の3つの特性を表現する方法である。半経験的方法は、理論的方法で必要となるグリーン関数を小地震による記録で代用する方法である。この方法は、観測波

形を多数重ね合わせることから、「半経験的波形合成法」とよばれており、その有用性はいくつかの文献で確認されている。本研究では、地震の際に防災科学技術研究所の強震観測ネットワーク、K-Net および基盤強震観測ネットワーク KiK-Net により観測された震源域の強震記録の概要を示し、その特徴を分析した後、理論的グリーン関数を用いたフォワードモデリングにより、宮城県北部地震のモデル化を行った。波形合成の対象とした観測地点は断層近傍の K-net の MYG006(古川)、MYG007(豊里)、MYG010(石巻)、KiK-net の MYGH06(田尻)、MYGH11(河北)の5ヶ所とした。(図1)この5箇所が震源近傍の観測点ではあるが今回の地震の場合強い地震動を記録したのがこの観測点の内側のためその間にある気象庁のデータも参考にした。気象庁のデータは(財)気象業務支援センターのものを使用した。

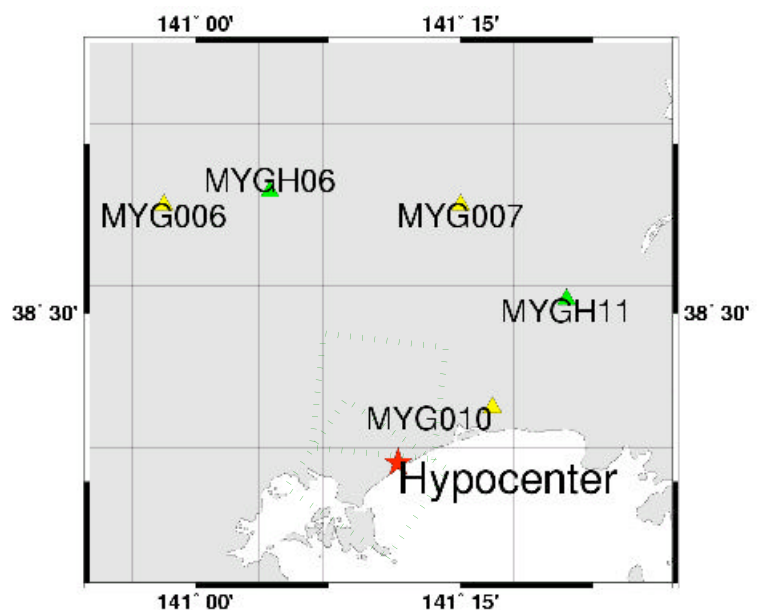


図1 解析対象とした観測点  
(緑の点線は今回解析した断層モデル)

## 2. 被害調査について

### 2.2-1 調査方法と目的

今回の地震を受けて川瀬研究室のメンバーで宮城県北部へ現地調査に行った。現地地震被害調査は、5名で車を2台使い行った。目的としては構造物の地震被害概要の把握を行うこと、そしてわが川瀬研究室で

行っている微動調査のデータを得ることである。調査期間は2003年7月31日・8月1日で、調査地点は鹿島台町・矢本町・鳴瀬町・南郷町・河南町(役場・病院・小学校・周辺の民家など)を回った。その時の詳しい様子は論文の方に記載してあるのでそちらを見て欲しい。ここではその一部の写真を掲載する。



写真① 矢本町役場周辺の地面の隆起



写真② 北村小学校の1階の柱

### 2.2-2 調査を終えて

この調査を終えて感じたことは震源付近から少し離れるだけで被害の出方が全然違うことであった。詳しく言うと鹿島台などの震源から北側では大きな被害が見られたが東側や西側ではそれほど被害は見られなかった。被害はまず道路の亀裂・陥没はかなり多かった。建物は古めのRC構造物や木造の被害が目立っていた。

## 3. 理論的グリーン関数を用いた震源モデルの構築

### 3.1 はじめに

波数積分法を用いた久田のプログラム(1995)でフォワードモデリング(計算波形が観測波形に合うようにモデルを変えて計算を繰り返し、最適モデルを探索していくこと)を行い震源モデルを構築する。我々は震源の時間特性、すなわちすべり速度関数に着目し空間的な不均質性はインバージョン解析の結果をもとにあらかじめすべり量の大きな領域、すなわちアスペリティとして抽出しておくことにする。

### 3.2 宮城県北部の震源地盤モデルの決定

まずは宮城県内のK-net, Kik-net 観測点の緯度・経度情報をXY座標に変換し、またそれぞれの加速度データをダウンロードしてそれを速度波形に変換した。この二つの材料からターゲットとなる5点を決定した。それぞれの地点に関して深い部分(地殻及び上部マントル)は関口・青井のインバージョンモデル(2003)を使用した。浅い部分については松尾・川瀬(2003)が同定した地盤モデルを使用した。ここでQ値が必要になってくるのだがそれは松尾・川瀬(2003)が地盤の同定に用いた $Q=19.05$ を使用した。仮定した地盤構造のうちMYG006(田尻)のものを下表に示す。

表1 仮定した地盤構造

MYG006

19					
Density(t/m <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Qp	Vs(m/s)	Qs	Th
1.42	350.00	19.10	58.10	19.10	0.50
1.42	350.00	19.10	83.00	19.10	1.50
1.75	1420.00	19.10	134.20	19.10	0.30
1.75	1420.00	19.10	121.00	19.10	3.10
1.75	1420.00	19.10	105.20	19.10	6.10
1.75	1420.00	19.10	151.20	19.10	1.50
1.75	1420.00	19.10	138.90	19.10	3.40
1.75	1420.00	19.10	148.30	19.10	0.40
1.75	1420.00	19.10	131.20	19.10	0.20
2.11	1880.00	19.10	471.60	19.10	63.30
2.33	3527.90	19.10	1699.90	19.10	630.00
2.36	3917.60	19.10	1988.60	19.10	570.00
2.45	4306.00	19.10	2287.40	19.10	600.00
2.67	5659.40	500.00	3400.00	500.00	119.70
2.60	5786.00	1000.00	3400.00	500.00	8000.00
2.60	6188.00	1000.00	3586.00	500.00	8000.00
2.60	6591.00	1000.00	3781.00	500.00	7000.00
3.00	6992.00	1000.00	3972.00	500.00	7000.00
3.40	7803.00	2000.00	4411.00	1000.00	0.00

表中のDensityは密度、 $V_p$ はP波速度、 $V_s$ はS波速度、Thは層の厚さを、そしてQ値は減衰を示す指標である。

### 3.3 宮城県北部地震の震源モデル化

まずは関口・青井(2003)の逆断層モデルから最終すべり量・最終すべり速度を計算して図化する。今回は北側と南側のセグメントの傾斜角が異なるために2枚の断層面を設定している。各断層のパラメーターを下の表2に示す。

表2 断層パラメーター

segment	size (length×width)	strike (deg)	dip (deg)
north	10km×16km	186.0	52.0
south	10km×16km	213.5	50.3

コンター表示ではなく要素断層ごとのブロック表示としたのはデータが持っている精度を理解した上でよりわかりやすくするために行った。グリッドは一つにつき2km×2kmであり北側のセグメントと南側のセグメントがそれぞれ10km×16kmの断層が仮定されている。このすべり量・すべり速度分布図と各グリ

ッドが持っている速度関数を検討してアスペリティを3つ設定した。震源を含む南側のセグメントで3つの中では一番深い所に『アスペリティ 1』(4km×4km)、北側のセグメントで3つの中では2番目に深い所に『アスペリティ 2』(2km×4km)、北側のセグメントで1番浅いところに『アスペリティ 3』(4km×3.8km)とした。ここでアスペリティというのは断層面の中で特にすべりの大きい領域をいう。上端深さはそれぞれ地表から6km, 4km, 200mである。当初アスペリティ3の上端深さはほぼ地表と同じというように設定されていたが表層部分の風化層内に断層すべりが入るのをふせぐために200mその深さを深くした。図2のすべり量分布図にはアスペリティの設定した場所を加筆している。

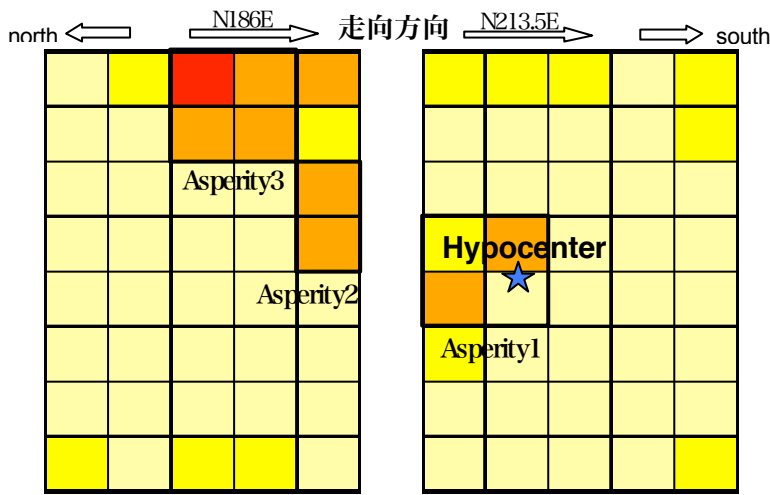


図2 すべり量分布図(ブロック表示)

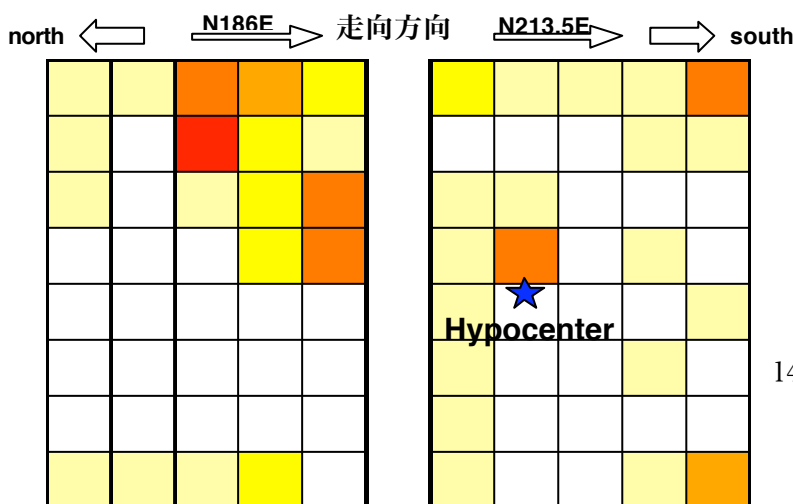


図3 すべり速度分布図(ブロック表示)

アスペリティを設定した後、久田のプログラム(波数積分法)で3つのアスペリティからの波形を計算

して震源近傍の MYG006, MYG007, MYG010, MYGH06, MYGH11 での観測波形と比較する。この波形を計算するために平均 rake angle, 断層方向とそれと直交する方向の座標系で解析対象とした5点の座標, すべり速度関数が必要である。初期モデルは関口・青井モデル(2003)を参考に決定した。そしてその3つのアスペリティからの波形を合成したものと観測波形が合うようにすべり速度関数を変えていった。変える事のできるものは破壊伝播速度, 立ち上がり時間, すべり速度関数の三角形の数, 三角形の高さ, 形である。このようにモデルを変えて計算を繰り返し、最適モデルを探索することをフォワードモデリングという。今回のすべり速度関数には一番初めの三角形で3パターン(立ち上がりと下がりの比が1:2, 1:3, 1:4のもの)を検討した。

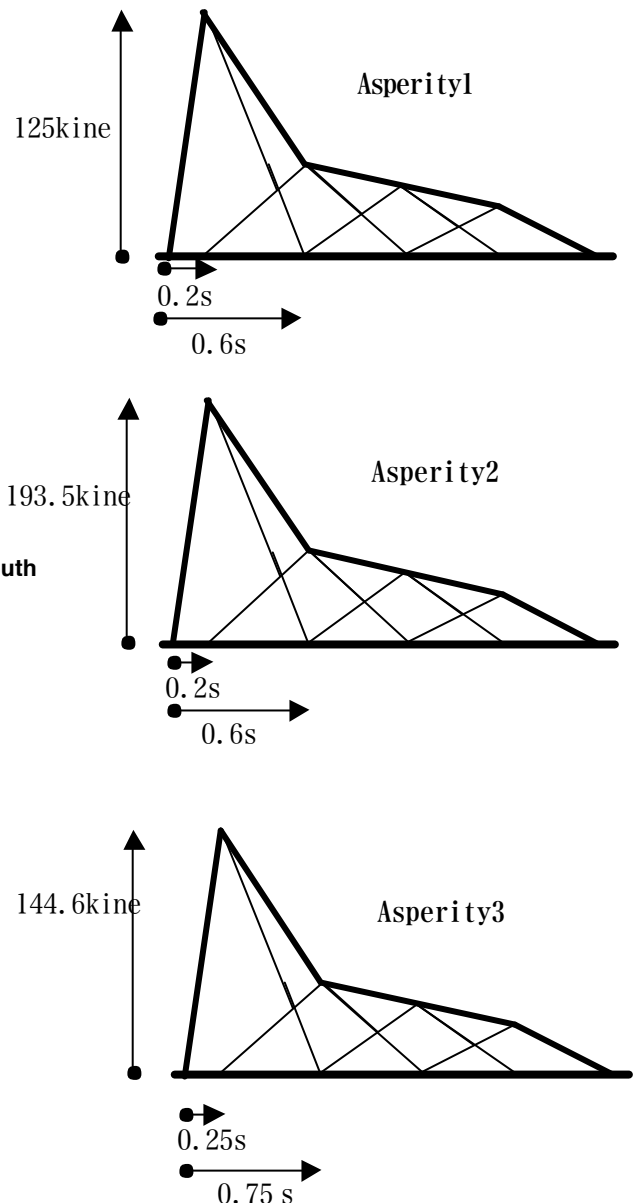


図4 各アスペリティの最終すべり速度関数

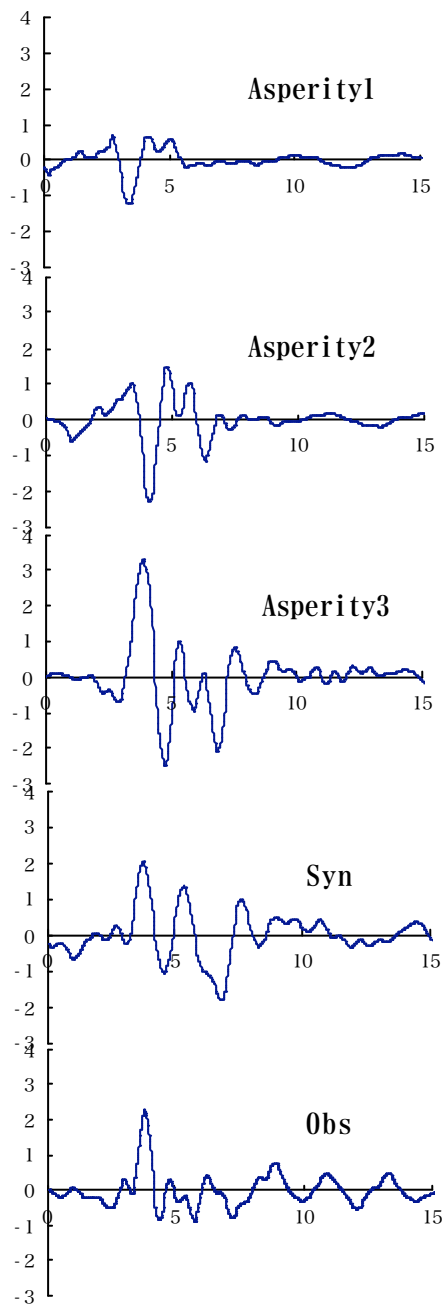


図5 MYG007の上下成分の理論速度波形と観測波形の比較

現時点での1番観測波形と合っているモデルの最終すべり速度関数を図4に実際に作成した速度波形(MYG007の上下成分)と観測波形の比較を図5に示す。この結果からわかることは最大すべり速度が兵庫県南部地震(川瀬・松島モデルだと818kine)や鳥取県西部地震(齋藤・川瀬モデルだと625kine)よりもかなり小さいことである。これは今回の地震で言われている加速度は大きくインパクトはあるが建物などに被害を与える速度があまり大きくないということにつながるのではないかとと思われる。図5からわかることは一番浅い位置にあるアスペリティ3から出ている波形が合成波に大きな影響を与えているとい

うことである。

#### 4. まとめ

本研究では理論的グリーン関数を用いて2003年7月26日に発生した宮城県北部地震の震源モデルの構築を行った。方法としては理論的グリーン関数を用いて、K-netの強震観測記録、KiK-netの基盤強震観測記録をターゲットに震源モデルを作成し、これらを用いて観測記録を再現することに成功した。

今回の解析により以下の知見が得られた。

1. これだけの加速度が出た理由として考えられるのは表層付近のやわらかい地盤の影響や一番すべり量が大きいアスペリティ3がごく浅いところに位置していたことなどが原因であると考えられる。
2. 強い加速度を観測した地域が震源域の北側に偏っているのは地震波が重なり合うことで地震動が大きくなること(ディレクティビティ効果)や北側のセグメントにすべり量が大きな領域が限られていたこと、そしてやはり地盤が軟弱である平野部が広がっているため増幅したのではないかと考えられる。
3. 強震動シミュレーションおよび強震動予測を行う際、適切な地盤モデル、適切な断層パラメータ、すべり速度関数モデルがあれば理論的グリーン関数により強震動はかなり精度よく再現できる。

今後の課題としてはより精度の高いすべり速度関数のチューニングを行いさらに観測記録に近づけるようにしていきたい。また逐次地盤モデルも改良を加え有用性が高まれば現在危惧されている宮城県沖地震の研究にも役立っていくと考える。

謝辞：K-net, Kik-net および気象庁データを使用させていただきました。

#### 参考文献

- 松島信一、川瀬博：1995年兵庫県南部地震アスペリティモデルの提案とそれによる強振動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第534号, 33-40, 2000
- Hisada, Y: An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 2), Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 1080-1093, 1995
- 関口春子・青井真・本多亮・功刀卓・先名重樹・藤原広行：K-net, Kik-netによる2003年7月26日宮城県沖の地震の震動・震源過程, 日本地震学会2003年秋季大会, 京都