

3次元差分法に基づく堆積盆地における 地盤増幅特性の異方性の検討に関する研究

土岐 崇喜

1. はじめに

日本は、その国土の約7割を山地が占めており、人々は海沿いの平野部だけでなく、周囲を山地に囲まれた小規模盆地においても都市を形成してきた。

このような小規模盆地は、大規模な平野に比べれば、そこに暮らす人々の数は決して多いとは言えないが、その数は少なくない。また、一般に地震防災対策の根幹となる地震動予測に資する地下構造データの蓄積やそれに基づく地震動の検討などは人口の多い海沿いの大規模平野に集中し、小規模な盆地ではそれらの検討が十分に行われているとはいえない状況にある。

しかし、その軟弱地盤の堆積環境によっては、地震動が非常に大きく増幅する可能性があることは言うまでもない。例えば、日本でも有数の小規模堆積盆地である諏訪盆地では熊野灘を震源とする1944年の東南海地震において、震央から320kmも離れているにも関わらず震度6を記録するなど、地盤増幅特性の影響を示唆する事例が観測されている¹⁾。

そこで小規模堆積盆地における地震動特性の検討の一環として、本研究では盆地の長軸方向と短軸方向の地盤増幅特性の違い、すなわち異方性に着目し、3次元差分法による地震動シミュレーションに基づき、小規模堆積盆地の形状や震源位置などと異方性の関係性について検討することを目的とする。

2. 観測記録に見られる小規模堆積盆地における地盤増幅特性の異方性

ここでは、諏訪盆地を例に、観測記録から小規模堆

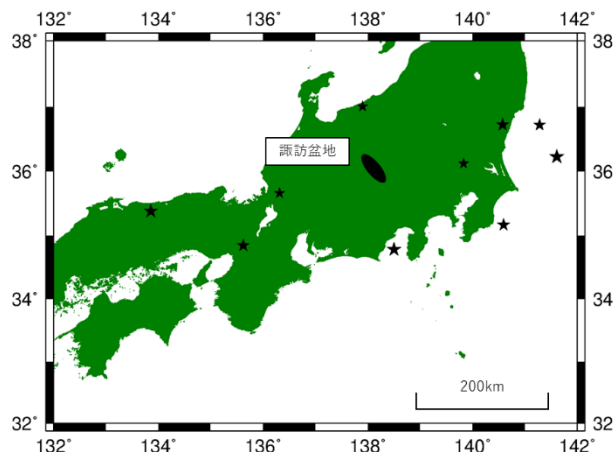


図1 諏訪盆地の位置、および観測記録を用いた地震の震央位置

積盆地における地盤増幅特性の異方性を抽出する。諏訪盆地内の強震観測点である防災科学技術研究所のK-NET 諏訪と盆地外で近傍の観測点であるKiK-net 辰野との地震動のフーリエスペクトル比を算出することで、盆地内の地盤増幅特性を抽出した。ただし、KiK-net 辰野は、地震基盤が露頭した観測点ではないため、観測記録を一次元重複反射理論²⁾に基づき、KiK-net 辰野のボーリングデータの物性値を用いて観測波形のはぎとりを行い、地震基盤波を算出した。本研究では、S波の地盤増幅特性を求めるために、フーリエスペクトルの解析区間はS波の初動から40.96秒間とした。また、震源距離に対して観測点間距離は小さいため、震源距離の違いによる補正は行っていない。

本研究で用いた観測記録は2008年1月から2018年9月までに観測された記録で、伝播経路特性の同一性

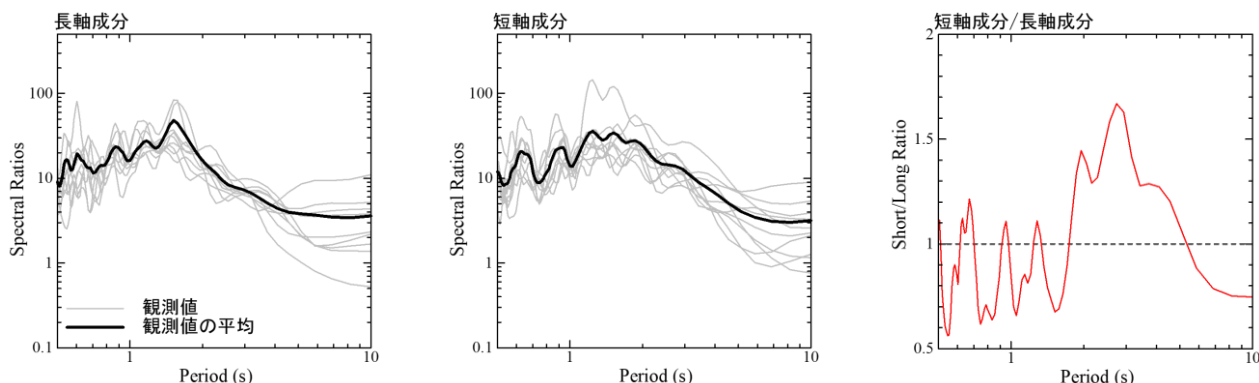


図2 諏訪盆地における長軸方向（左図）、短軸方向（中央図）の地盤増幅特性
長軸方向における短軸方向の比（右図）

やノイズの少なさ、地盤の非線形化が生じていないことに配慮して、以下の条件を満たすものとした。

- 1) 2観測点における震央との方位角が5度未満
- 2) マグニチュード5.0以上
- 3) 最大加速度が200cm/s²以下

上記の条件を満たした10地震の震央を図1に示す。そして、N320Eの方向を諏訪盆地の長軸方向として、長軸方向と短軸方向の地盤増幅特性を求めた。

図2に求めた地盤増幅特性、および長軸方向に対する短軸方向の地盤増幅特性の比を示す。なお、地盤増幅特性の図中の黒実線は10地震の相加平均である。2つの方向の地盤増幅特性には、長周期帯域において顕著な違いが見られる。短軸方向の地盤増幅特性は、2~4秒の周期帯において長軸方向の地盤増幅特性を上回り、周期2.7秒で約1.7倍となった。一方、5秒よりも長周期側で長軸方向の地盤増幅特性が短軸方向のそれを上回る。

3. 3次元差分法による地震動シミュレーション

諏訪盆地での観測事例を踏まえて、盆地の形状や盆地の中心の深さ、盆地と震源の位置関係と長周期帯域における地盤増幅特性の異方性の関係性を把握するため、本研究では3次元差分法による地震動シミュレーションを行った。本研究で使用するプログラムは、防災科学技術研究所によってパッケージ化されたツールであるGMS³⁾である。

本研究において計算に用いる基本構造モデルは諏訪盆地の地下構造⁴⁾を参考にして、短軸が5kmで長軸が15kmの楕円型の平面で、深さが2kmの楕円体とした。図1に基本構造モデルの模式図と物性値を示す。楕円体の物性値は狐崎・他⁵⁾と太田・他⁶⁾による密度

kg/m³、P波速度V_p (km/s)とS波速度V_s (km/s)との関係式より下記の(1)(2)式より算出した。

$$V_p = 1.29 + 1.1V_s \quad (1)$$

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (2)$$

3次元差分法で用いた基本構造モデルの減衰定数は各層のS波速度(m/s)の1/10と設定した。盆地部分は表2における層番号1で、楕円体以外の部分は層番号2の2層構造で解析を行った。

本研究では、堆積盆地構造による地盤増幅特性を検討したため、地盤構造全体を表2における層番号2とした基盤モデルも同時に解析し、それぞれのスペクトル比をとって地盤増幅特性とした。

そして、短軸と長軸の比を形状比と定義し、基本構造モデルから、形状比を5:10と5:5に、さらに盆地の中心深さを4kmと1kmに変更しながら、計算を行った。

震源は点震源とし、震源メカニズムは、走向:60度、傾斜:90度、すべり角:30度、地震モーメントは1.0×10¹⁷Nmと設定した。

地下構造モデルの格子間隔は基本構造モデルにおける最小S波速度が1200m/sであり、S波1波長あたり5格子を確保するために、格子間隔は水平、鉛直ともに深さ3km未満で100m、それ以深で300mとした。解析領域の側面および底面の内側にかけて約2kmを人工的な反射を防ぐための吸収領域とした。解析の時間刻みは0.01秒、時間ステップは6000、継続時間は60秒と設定した。

4. 解析結果

4.1 基本構造モデル

3次元差分法によって計算された、基本構造モデルの

表2 計算に用いる基本となる物性値

層番号	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q値
1	2610	1200	2130	120
2	4590	3000	2560	300

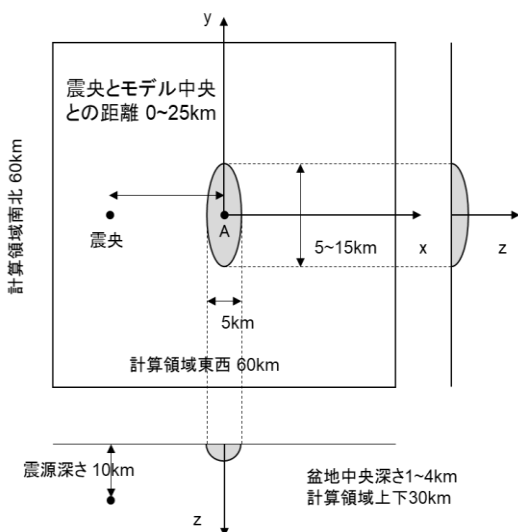


図3 計算に用いる地盤構造モデル

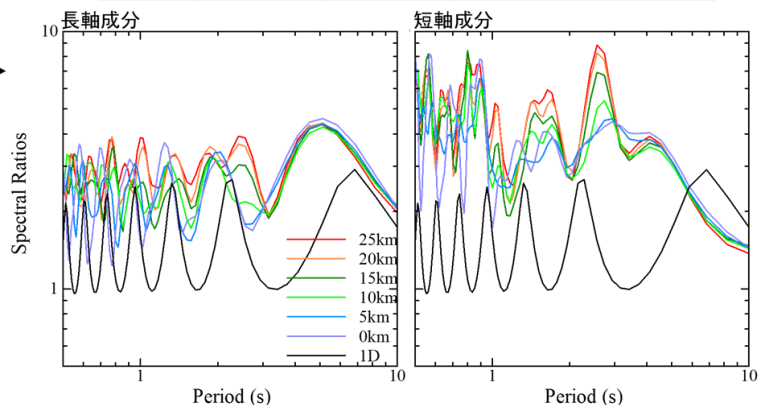


図4 基本モデルの観測点Aにおけるスペクトル比

観測点 A における震央距離が 0~25km の 6 種類の地盤増幅特性を図 4 に示す。解析波形に対しては 0.1~1.5Hz のバンドパスフィルターを施し、フーリエスペクトルの解析区間は S 波の初動から 40.96 秒間とした。

図 4 の結果より得られた観測点 A における地盤増幅特性は、震央距離が離れるほど大きい。また、観測記録と同様に 2~4 秒において短軸成分の方が長軸成分より地盤増幅特性が高く、周期 2.4 秒で 2.3 倍の地盤増幅特性を持っている。4 秒以降においては長軸成分の方が高い傾向を示している。

また、黒線で示した地盤増幅特性は盆地中心点の 1 次元地下構造を用いて 1 次元重複反射理論²⁾で算出した。図 4 より、長軸成分と短軸成分ともに黒線の 1 次元地盤増幅特性よりも高いことが分かる。これは 3 次元の波動の伝播による影響であると考えられる。

4.2 モデルから形状・中心深さを変更した場合

次に基本モデルから形状比と深さを変更した場合を震央距離が 0~25 km で解析した結果を図 5 と図 6 に示す。

形状比が 5 : 10 である図 5 の左図では、基本構造モデルと同様な傾向を示し、2~4 秒では短軸成分において地盤増幅特性が長軸成分より大きく、それ以降では長軸成分の方が大きい。そして、5 : 5 に変化すると振幅に差が見られるが、ピーク周期の変化は概ね一致する。またすべてのモデルを通じて、大堀・他⁷⁾における、盆地構造では 1 次元成層構造の卓越周期よりも短

周期化するという指摘と対応している。

5. モデルにおける周期特性の考察

解析したモデルにおける地盤増幅特性のピーク周期の異方性について述べる。図 7 にそれぞれのモデルの長軸方向と短軸方向における 1 次、2 次ピーク周期を示す。長軸方向と短軸方向のピーク周期の差を比べると、形状比が 5 : 15 から 5 : 10、5 : 5 に変化するとつれて差が縮まり、形状比が 5 : 5 の際には 1 次ピーク周期における異方性が見られなくなる。また 2 次ピーク周期では 1 次元地下構造の 2 次ピーク周期付近で推移している。

また、盆地の中心深さの変化では、中心深さが 4km から 2km になるにつれて 1 次ピーク周期の差は縮まりつつあるが、中心深さの変化ではピーク周期に異方性が見られる。また、2 次ピーク周期では形状比の変化と同様に、1 次元地下構造の 2 次ピーク周期付近で推移している。

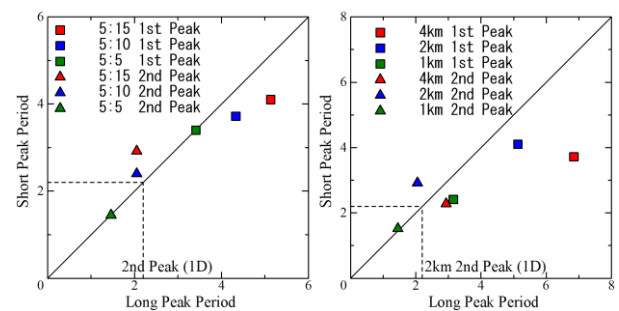


図 7 それぞれのモデルの周期特性の推移 (左図：形状比による推移, 右図：中心深さによる推移)

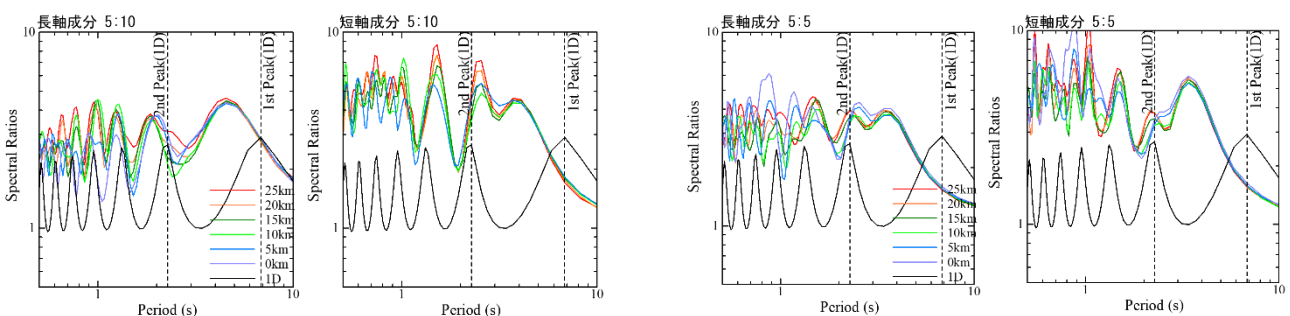


図 5 形状比の変動におけるスペクトル比 (左図 5 : 10, 右図 5 : 5)

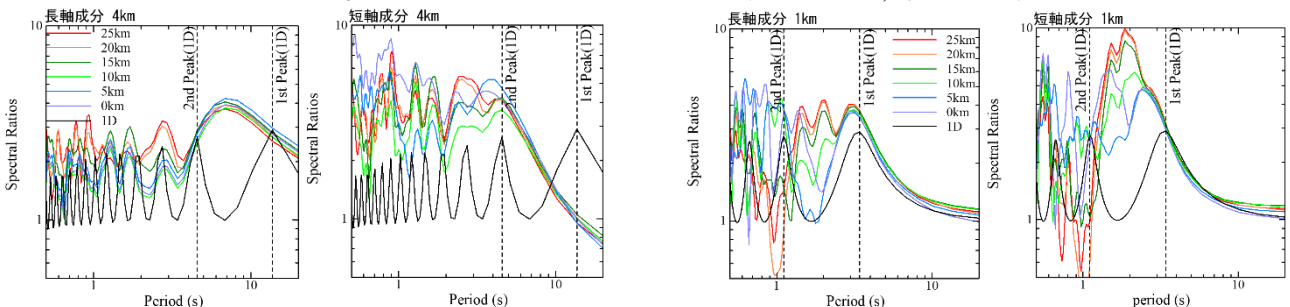


図 6 中心深さの変動におけるスペクトル比 (左図 4km, 右図 1km)

6. 地形の3次元効果

形状や中心深さの3次元による影響を考察するため、GMS で求めた地盤増幅特性を1次元地盤増幅特性で除したものを考え、これを地形の3次元効果と定義する。

図8、9にそれぞれのモデルの3次元効果を示す。それぞれのモデルにおいて震央距離が25kmの場合に3次元効果が顕著に表れている周期を黒三角で示しているが、地形の3次元効果が顕著にみられる周期帯は1次元重複反射理論における1次ピークと2次ピークとの間に存在している。

そして、長軸方向と短軸方向の3次元効果の最大値の倍率を比較すると、形状比が5:15から5:10、5:5に変化するにつれて、短軸方向の方が、1.94倍から1.3倍、そして1.46倍と推移している。また、中心深さが4kmから2km、1kmに変化すると、短軸方向の方が、0.6倍から1.94倍、そして2.46倍と推移しており、中心深さ4kmの場合を除けば、短軸方向の方が長軸方向よりも3次元の波動の伝播による影響を受ける。

7. まとめ

本研究では、小規模堆積盆地における異方性を把握するため、諏訪盆地を例として観測記録から地盤増幅特性を抽出した。そして、諏訪盆地での観測事例を踏まえ、盆地の形状や盆地の中心の深さ、盆地と震源の位置関係と長周期帯域における地盤増幅特性の異方性の関係性を把握するためにGMSを用いた地震動シミュレーションを行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 諏訪盆地では長軸方向と短軸方向において異なる地盤増幅特性を持っている。
- 2) 中心深さが4kmから2km、1kmになると、長周期

帯域において長軸成分と短軸成分の地盤増幅特性に差が見られなくなり、1次元地下構造の地盤増幅特性と同様な変化をする。

- 3) 形状比が5:15から5:5に変化するにつれて、長軸方向と短軸方向における1次ピーク周期に差が縮まる。
- 4) 地形の3次元効果が顕著にみられる周期帯は、長軸方向と短軸方向の両者ともに1次元の地盤増幅特性における1次ピークと2次ピークとの間に存在している。また、3次元効果の最大値を比較すると、一部を除けば短軸方向の方が、長軸方向よりも地形の3次元効果を受ける。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所のKiK-netのボーリングデータ、およびK-NET、KiK-netの観測記録を使用した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長野県建築士会諏訪支部、長野県建築設計事務所協会諏訪支部：諏訪盆地地盤図、1987
- 2) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975
- 3) 青井真, 早川俊彦, 藤原広行.地震動シミュレータ:GMS, 物理探査, 第57巻, pp. 651-666, 2004
- 4) 田守伸一郎, 平野貴織: 諏訪盆地における常時微動観測によるS波速度構造の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第596号, pp. 159-164, 2005
- 5) 狐崎長琅, 後藤典俊, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 斉藤徳美, 黒田徹, 山根一修, 奥田宏一: 地震動予測のための深層地盤P、S波速度の推定, 自然災害科学, 第9巻, 第3号, pp. 1-17, 1990
- 6) 太田外氣晴, 江守勝彦, 河西良幸: 耐震・振動・制御, 共立出版, 339p., 2001
- 7) 大堀道広, 瀨瀬一起, 南忠夫: 3次元AL法による堆積盆地の地震動解析, 地震研究所彙報, 第65巻, pp. 809-850, 1991

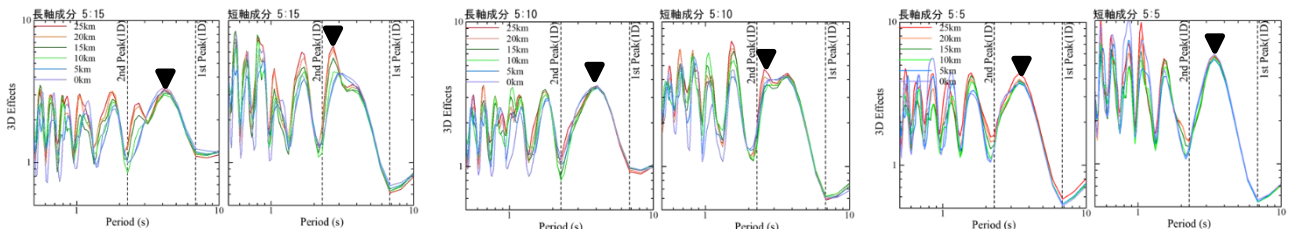


図8 形状比の変化によるモデルの3次元効果の推移 (左図 5:15, 中央図 5:10, 右図 5:5)

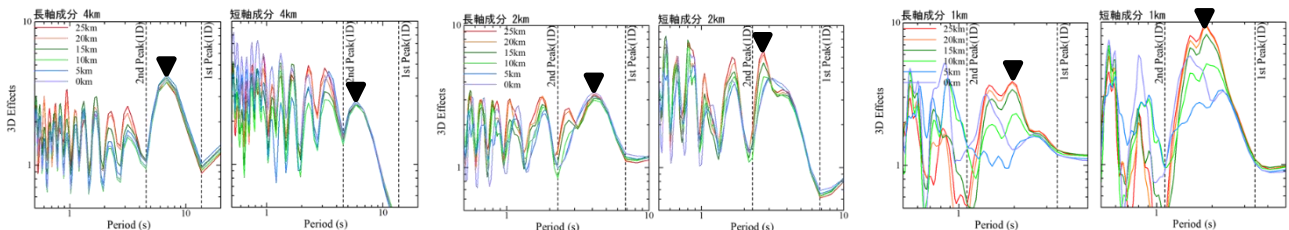


図9 中央深さの変化によるモデルの3次元効果の推移 (左図 4km, 中央図 2km, 右図 1km)