

## 青森県内のKiK-net4 地点における增幅特性の水平方向異方性について\*

弘前大学 片岡俊一

### 1.はじめに

地震動の推定や評価のためには、S波速度構造が必要である。しかしながら、青森県にあってはS波速度が調査され公表されている地点が少ないため、K-NETとKiK-netの公表値を参照する割合が高い。しかしながら、K-NETとKiK-netの公表値を見直した報告は数多くあり、公表値を利用する前に確認が必要であろう。KiK-netは地中と地表に地震計が設置されていることから、鉛直入射するS波を仮定して、重複反射理論を適用して地下構造を確認できる。

そこで、青森県内の4地点のKiK-net観測点で得られた地震記録を用いて地中と地表とのスペクトル比を求めてみたところ、水平2方向で增幅特性が異なる事例を見つけた<sup>1)</sup>。本報告は既報の不十分であった点に説明を加え、既往のサイト增幅特性との比較や震源位置への依存性を報告する。

### 2.対象観測点と選択した地震記録

検討対象とした観測点は、青森県にあるKiK-net観測点のうちの十和田湖東(AOMH12)、新郷(AOMH16)、名川(AOMH17)、田子(AOMH18)である。

対象地点において1996年6月から

2018年9月30日までに観測された地

震動から野津・他<sup>2)</sup>が強震観測点のサ  
イト增幅特性を定めた際の条件である:  
震央距離が150km以内、マグニチュー  
ドが5.0以上、最大加速度が2.0~100  
galの範囲の地震動を選択した。この  
結果表1に示す数の地震が選択された。

なお、選択した全ての地震記録は結果的に2000年以降のものとなった。本報告では、水平2方向の增幅特性が異なることを示す。その前提として、地中と地表の地震計の設置方位にずれがないことを確認する必要がある。KiK-netの資料を調べた結果も表1に示してあるが、対象の4地点において設置方位のずれは小さい。

選択された地震の震央位置を図1に示す。図を見ると地震の多くは太平洋側で起きていることが分かる。しかしながら、内陸の地震も少なからずあり、また南北方向の分布範囲も広いので、観測点に対して一方向から入射しているとは言えない。参考のために、方位を45度に分けて方位毎の地震数を調べてみた。その結果を図2に示す。

表1 選択した地震数

観測点名	コード	地震数	設置方位(°)
十和田湖東	AOMH12	68	3
新郷	AOMH16	73	3
名川	AOMH17	76	5
田子	AOMH18	52	4

設置方位はKiK-netのwebページより  
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/db/siteangle.html>

\* Horizontal anisotropy of amplification characteristics at four stations of KiK-net in Aomori prefecture by Shunichi Kataoka

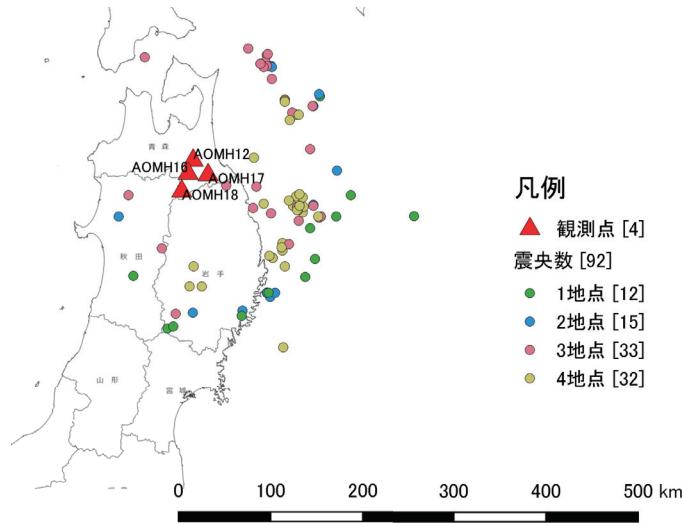


図1 選択された地震動に対応する震央位置

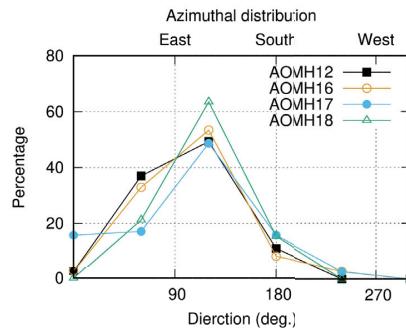


図2 震源方位の分布（比率で表示）

### 3. 地中と地表のスペクトル比の算出

地中と地表とのスペクトル比は石田の提案手法<sup>3)</sup>により求めた。文献3)では、地中と地表のスペクトル比を地中から地表への伝達関数と称し、以下の式を伝達関数の推定値とすることを提案している。

$$H_{y/x}(f) = \sqrt{\frac{S_{yy}(f)}{S_{xx}(f)}} \sqrt{\frac{S_{xy}(f)}{S_{yx}(f)}} \quad (1)$$

ここで、 $S_{xx}(f)$ 、 $S_{yy}(f)$  はそれぞれ地中と地表の地震動記録のパワースペクトルを表し、 $S_{xy}(f)$ 、 $S_{yx}(f)$  は地表と地中、地中と地表のクロススペクトルである。この伝達関数の振幅は式(1)より地中と地表のスペクトルの比となっていることが分かる。

実際の計算に当たっては、各々の地震記録の主要動開始時刻から 20.48 秒のデータを対象とし、バンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウを施した。さらに、文献3)に倣い、全ての地震記録の相乗平均を求めた。

#### 4. 実測値による地中と地表のスペクトル比と考察

各成分毎のスペクトル比の絶対値および位相差の平均値を図3に示す（図中のObs., 以下では実測と言う）。スペクトル比については、公表されている地下構造から算出した理論スペクトル比（図中のTheory, 以下では理論増幅と言う）も描いてある。理論スペクトル比はピークが目立つように、 $h=0.01$ と極めて小さな減衰を仮定している。さらに、文献3)に記載されているスペクトルインバージョンによるサイト增幅特性（図中のEmpr., 以下ではサイト增幅特性と言う）も同じ図に示してある。

AOMH12（十和田湖東）においては、実測値のNS方向とEW方向ではスペクトル比はほぼ同じ形状をしているものの、8Hz付近のピークではEW成分のピーク振動数の方がNS成分よりも高い。一方、5Hz付近のピークでは、NS成分の方が高い振動数でピークとなる。これに対応してか、位相もNS成分、EW成分で同じである区間と異なる振動数区間がある。位相の違いは高振動数になるに従って大きくなっている。

理論増幅と実測との関係を見ると、低次の1.5Hz, 3.5Hz, 5Hz付近でピークがあることは対応しているが、最も高いピークである8Hz付近に理論増幅のピークは見られない。サイト增幅特性と実測とを比べると、5Hz, 8Hz付近にピークがあることは対応している。ただしサイト增幅特性は低い振動数におけるピークの高さが高いが実測は低い。また、サイト增幅特性に見られる0.8Hzのピークは実測には見られない。このような低振動数における振幅の違いの原因として解析時間長さが関係していると考えている。文献3)では後続の位相もサイト增幅特性であるとして考慮しているが、本報告では主要動部分に限っている。

AOMH16（新郷）では、実測のスペクトル比はAOMH12と同様に水平2成分でほぼ同じ形状をしており、ピーク振動数のずれも小さいが明確に異なっている。位相差は、NS成分の方が遅れているように見える。この地点では、実測と理論増幅特性のピーク振動数は6Hz程度まで、ほぼ対応しているように見える。サイト增幅特性と実測を比較すると8Hz程度までピーク振動数は対応しているものの、スペクトル形状は異なり、サイト增幅特性は低振動数で大きく、本報告では5Hz付近のピークがもっとも高い。

AOMH17（名川）では、実測のスペクトル比は8Hzに水平2成分とともにピークがあるが、それより低い振動数では、NS成分にピークが見られるもののEW成分では見られなかった。位相差は水平2成分とともに綺麗な変化を示している。理論増幅でも8Hz付近にピークがあるので、これは実測と対応しているが、これ以外の理論増幅のピークは実測と対応していない。サイト增幅特性も8Hzにピークがあることは実測と同じである。

AOMH18（田子）では、実測のスペクトル比のピークは水平2成分でやや振動数が異なるものの、ほぼ対応してた。このうち、8Hz付近のピークの水平2成分でのずれがもっとも大きい。位相差はAOMH17と同様に綺麗に変化している。理論増幅のピーク振動数は実測と異なっているものに、どうにか対応をつけることは可能である。サイト增幅特性の形状は実測と良く対応している。

なお、平滑化する際のバンド幅を変化させてスペクトル比が安定しているか確認してみた。その結果、バンド幅によらず同様のスペクトル比が得られた。このことから、本報告でのスペクト

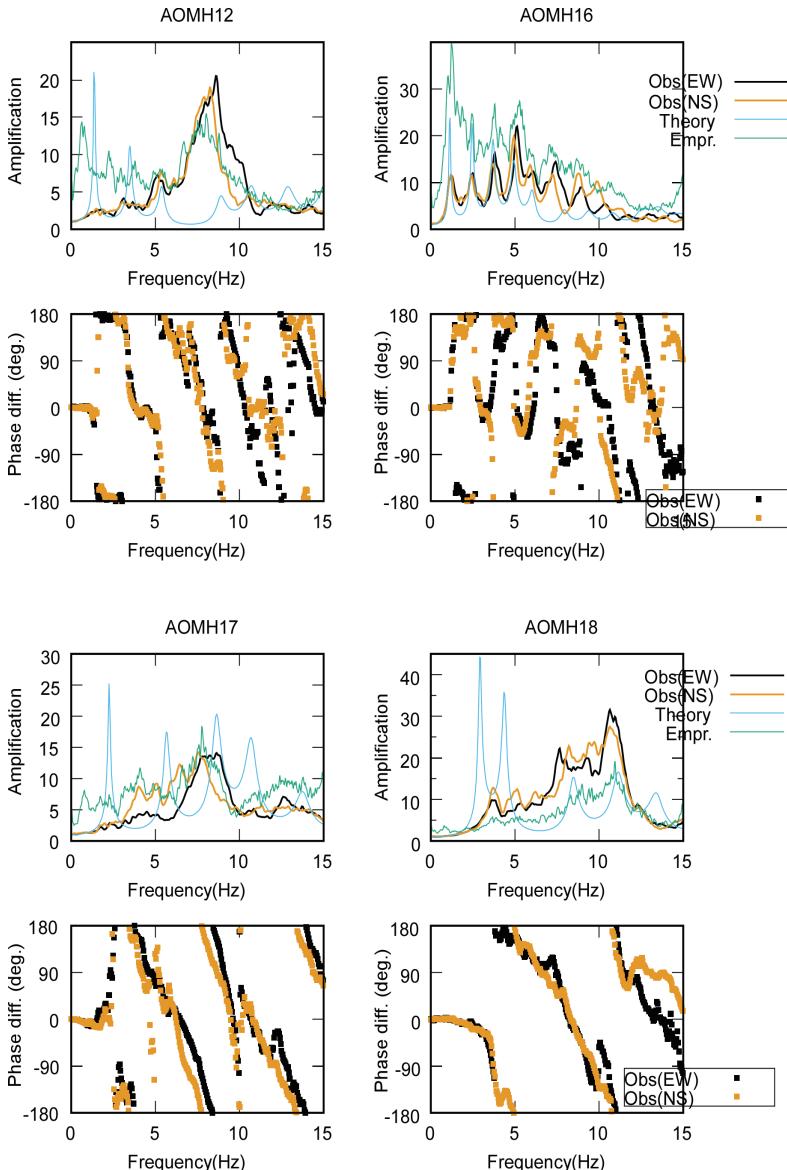


図3 4地点の観測伝達関数。図中のObsが実測値、Theoryが理論增幅曲線であり、Empr.がサイト增幅特性。

ル比は安定した結果であると考えている。

## 5. 考察

2つの水平方向成分で增幅特性が異なる理由としては様々なことが考えられる。例えば、地中深い地点で地層が傾斜しており、入射方向によって生成される波動成分が異なること、地表近くでの不整形性、水平成層だとしてもS波の速度異方性などが挙げられよう。これらのこととを検討

するためには、震源の方位依存性や、水平面内で最も卓越する方向の検討、あるいは地表付近の傾きの卓越方向を調べることが必要と考えている。

ここでは、地下構造は水平成層であると仮定し、速度異方性の可能性を検討した。理論増幅スペクトルと観測増幅スペクトルが比較的近いAOMH16とAOMH18を対象に、S波速度を総当たり法によって各成分毎に求めてみた。特定の層のS波速度が成分によって大きく異なるのであれば、速度異方性の可能性が考えられる。

総当たり法は以下のように2段階で行った。まず、表層数層のS波速度を公表値を平均値とし、 $\pm 30\%$ の範囲を8等分して速度構造モデルを仮定し、各々について理論増幅曲線を計算した。ピーク振動数のみに着目し、理論増幅曲線のピーク振動数と実測のピーク振動数の差が最も小さいモデルを第1段階の最適モデルとした。ついで、そのモデルの結果を平均値として、 $\pm 15\%$ の範囲を8等分した速度構造モデルを作り、先と同様に最適値を求めた。この手順により最適モデルを求めた。変化させなかった深部の層のS波速度は公表値のままでし、層厚は公表値を用いた。ここでは、ピーク振動数のみを対象としていることから、逆解析にあたっての地盤の減衰の影響はないので、各層とも同様に0.03とした。対象とするピークと推定する層数は観測点によって変えた。

結局、AOMH16では、低次の4つのピークを対象にし、表層7層の速度を求めた。一方、AOMH18では、低次の3つのピークを対象にし、表層6層の速度を求めた。その結果得られた最適モデルによる理論増幅特性を観測値と比較して図4に示す。AOMH16はピーク振動数ばかりか形状もよく対応している。AOMH18ではピーク振動数は対応している。なお、上に述べたように地盤の減衰は0.03と一定値として扱ってため、ピーク振幅が一致しないのは致し方ない。

最適モデルのS波速度分布を図5に示す。AOMH16では第2層と第5層のS波速度の違いが大きいモデルが最適となった。このうち、第5層は柱状図で砂礫とされている層である。佐藤・他は砂礫層において速度異方性があることを報告しており<sup>4)</sup>、今回の結果に対応している。AOMH18では、第3層と第6層のS波速度の違いが大きいモデルが最適となった。

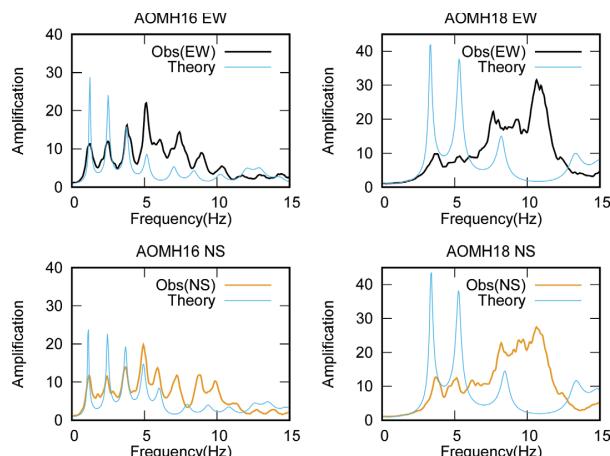


図4 総当たり法を用いて推定したS波速度構造から算定した理論増幅特性と観測値との比較

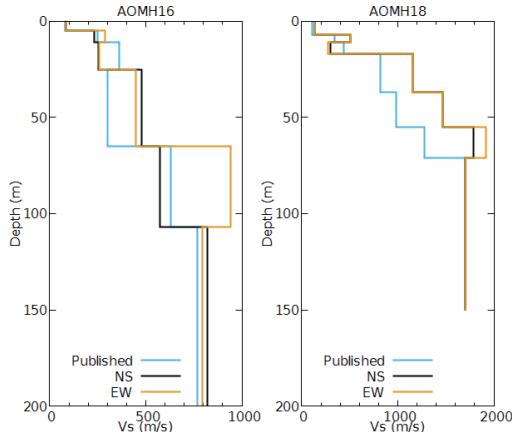


図5 総当たり法を用いて推定したS波速度構造と公表値との関係

## 6.まとめ

KiK-netの速度構造を利用することを考えて、青森県内の4観測点で公表されているS波速度構造の妥当性を検討した。具体的には、地中と地表とで観測された地震動のスペクトル比を求めてみたが、NS成分とEW成分でスペクトル比の形状は異なっていた。さらに、実測のスペクトル比と公表されているS波速度構造から算出される理論増幅特性のピークを比較すると、4地点中AOMH16（新郷）とAOMH18（田子）の2地点ではどうにか対応がつけられるが、他の2地点は説明し難いものであった。理論と対応がつく2地点については、ピーク振動数を説明するS波速度構造モデルを公表値を初期値として求めることができた。

水平2成分の増幅特性が異なる理由として、本報告では、S波速度の異方性を検討したが、更に検討すべき項目は多く、それらは今後の課題としたい。

## 謝辞

本報告は、弘前大学理学部地球環境学科における平成30年度卒業研究として田中早紀さんが行ったものを再整理したものである。計算結果は全て田中さんによるものである。記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) 片岡俊一：青森県内4地点のKiK-netにおける水平方向の異方性について、令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演梗概集, CS12-17, 2019
- 2) 野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性、港湾空港技術研究所資料, No.112, 2005
- 3) 石田寛：地震観測記録を用いた伝達関数の評価手法に関する検討、1992年度日本建築学会関東支部研究報告集, 13-16, 1992.
- 4) 佐藤清隆, 佐々木俊二, 東貞成, 武田智吉, 石川博之：鉛直アレイ地震観測にもとづく堆積砂礫層での水平方向の異方性について、土木学会第54回年次学術講演会, I-B134, 266-267, 1999.