

表層地盤の非線形挙動の影響を避けるため、振幅の大きい記録の使用は避けることが望ましい。

解析の対象とする記録の長さにも注意が必要である。観測された地震動から何らかの方法で「S波部分」を抜き出し、そのフーリエスペクトルを解析対象とする考え方もあるが、港湾の施設を対象とする場合には、S波のみならず表面波も解析対象として、波形後半まで含めたフーリエスペクトルの増幅特性を求める必要がある。

野津・長尾<sup>22)</sup>は、港湾地域強震観測の強震記録に K-NET、KiK-net 等の強震記録を加えたデータセットに対してスペクトルインバージョンを適用し、港湾を始めとする各地の強震観測地点でのサイト増幅特性（地震基盤～地表）を求めている。この結果は CD-ROM<sup>22)</sup>で公開されている。

### (3) 対象港湾とその周辺での同時記録からサイト増幅特性を評価する方法

対象港湾とその周辺の観測点で同じ地震の記録が得られており、かつ、周辺の観測点ではすでにサイト増幅特性が評価されている場合、対象港湾におけるサイト増幅特性を以下の方法で評価することができる。まず、周辺の観測点での観測記録を説明できるように、対象地震の震源特性を適切に設定する。次に、対象港湾でのフーリエ振幅スペクトルを震源特性と伝播経路特性で除すことによりサイト増幅特性を求めることができる<sup>23)</sup>。対象港湾とその周辺の観測点が震源から見てかなり異なる方位に位置する場合には、対象地震の震源特性の方位依存性の影響で評価の精度が低下する可能性があることに注意する必要がある。

対象地震が十分に遠方で発生している場合、港湾とその周辺の観測点での記録は震源特性と伝播経路特性を共有していると考えられるので、震源特性の評価を省略し、2点間のスペクトル比をとることにより、対象港湾でのサイト増幅特性を評価することができる。特に遠方で発生した大地震の記録は、スペクトルインバージョンには適さないが、低周波側まで S/N 比が良好である場合も多く、このような形で利用できることも少なくない。図-1.2.3は、2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震（M7.1及びM7.4）の記録を利用して、SZO013（K-NET 清水）の SZO014（K-NET 静岡）に対するサイト増幅特性の比を求め、スペクトルインバージョンに基づくサイト増幅特性の比と比較したものであるが、両手法によるサイト増幅特性の比は良く一致していることがわかる。

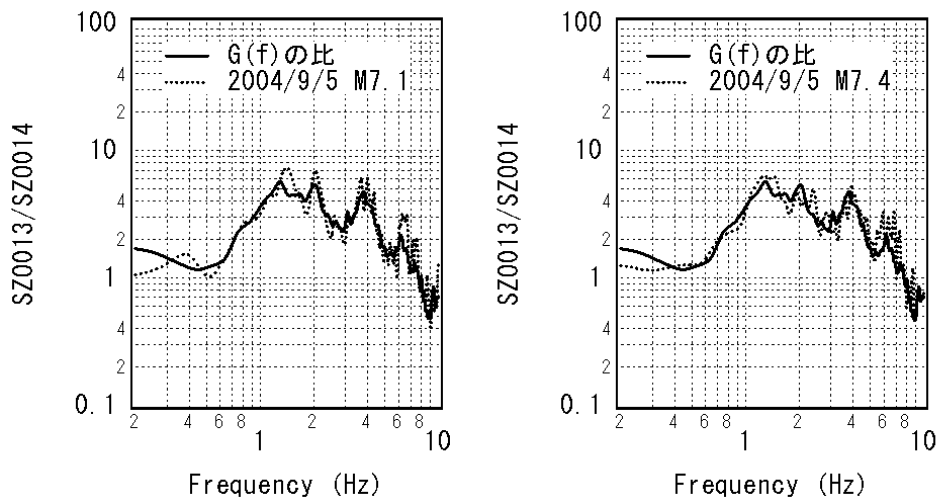


図-1.2.3 二通りの方法で評価したサイト増幅特性の比

### (4) 対象港湾で地震観測記録が得られていない場合のサイト増幅特性の評価

サイト増幅特性は、対象港湾、若しくはその近傍（港湾から2km以内）のK-NET等の地震観測地点における観測記録に基づいて評価することが望ましい。また、そのような記録が得られていない場合には、対象港湾で短期間の地震観測（(1)サイト増幅特性の評価のための地震観測参照）を行い、得られた記録に基づいてサイト増幅特性を評価することが望ましい。しかし、工期が差し迫っているなどの理由で地震観測ができない場合には、周辺のK-NET（又はKiK-net）の観測地点におけるサイト増幅特性から、以下に述べる経験的關係を利用して、対象港湾でのサイト増幅特性を推定することができる<sup>22)</sup>。この方法には以下に述べるように、大別すると常時微動を用いる方法と、港湾と周辺の強震観

測地点のサイト増幅特性の経験的關係を利用する方法の2種類の方法がある。

① 常時微動観測の結果を用いて推定する方法

常時微動とは、地震が発生していない状態での、一般には感じる事ができないほどの小さなレベルの地盤の振動である。常時微動には表面波が卓越している場合が多いと考えられ、表面波の性質を利用することによって、サイト増幅特性のピークに関する有益な情報が得られる。すなわち、常時微動観測結果の水平と鉛直のスペクトル比（以下、H/V スペクトル）に明瞭なピークが存在する場合、その1次のピーク周波数はサイト増幅特性の1次のピーク周波数と概ね一致することが多い。図-1.2.3.1にその例を示す。HRS013（K-NET 広島）では1.1Hz程度、広島-Gでは0.8Hz程度が1次のピーク周波数である。なお、ここで述べるサイト増幅特性は地表面における値であることを注意が必要である。

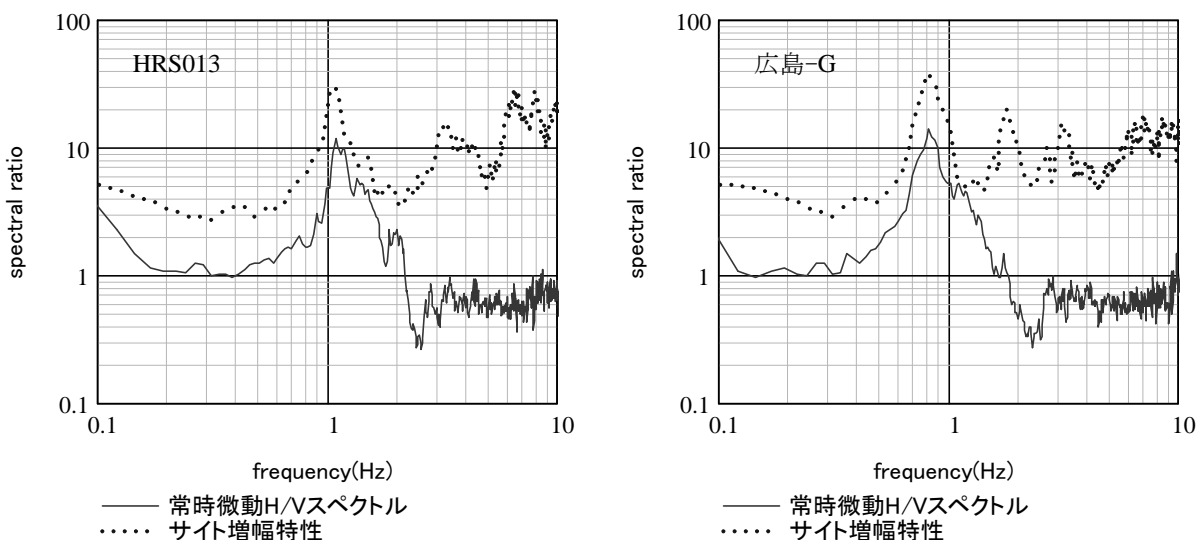


図-1.2.3.1 常時微動H/V スペクトルとサイト増幅特性の比較

常時微動観測に用いるセンサーは速度計または加速度計が一般に用いられる。堆積層が厚い地点の観測を行う場合は、低周波数領域までフラットな特性を有するセンサーを用いることが重要である。また、ここで扱う常時微動はあくまでも地盤の振動を計測することが目的であるので、構造物の影響を非常に強く受ける地点や地下に空洞または大規模な埋設物がある地点で計測を行うべきではない。また、重機などの強い交通ノイズの影響を受ける地点も観測地点としては不適切である。

常時微動 H/V スペクトルの算出方法には現時点では定まった方法はないが、港湾においては幅広い周波数帯におけるサイト増幅特性との調和性の確認を行い、データが蓄積されている方法として以下に述べるものがあるため、その方法に準じることが望ましい。

- (i) 観測記録から交通ノイズなどの影響の少ないと判断される 163.84 秒の区間を3区間抽出する。
- (ii) 水平成分は、直行する2成分の自乗和平方根とする。
- (iii) 水平、鉛直成分にバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを用いてスペクトルの平滑化を行う。
- (iv) 水平と鉛直成分の比を求め、これを抽出した3区間について平均して常時微動 H/V スペクトルとする。

常時微動 H/V スペクトルは低周波数領域でノイズの影響を受けやすいために、ピークを誤って判断してしまう可能性がある。このため低周波領域で常時微動 H/V スペクトルの振幅が大きな値を示す場合は、3つの区間のそれぞれの値がばらついていないかなど、妥当な結果が得られているかどうか慎重に吟味を行う必要がある。

常時微動 H/V スペクトルを用いてサイト増幅特性を推定する方法は以下の通りである。

まず、2地点のサイト増幅特性の1次のピークにおける振幅に違いがないと想定される場合は、以下のようにサイト増幅特性を推定することができる<sup>23-1)</sup>。いま地盤が表層と基盤の2層の簡単な条件で、2地点の表層の層厚のみが違う場合を想定すると、2地点の周波数伝達関数は周波数軸に関

して1次のピーク周波数の比で比例配分すると一致する。このことを利用して、港湾周辺の地点のサイト増幅特性を、周波数軸に関して2地点の常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク周波数比で比例配分することで港湾のサイト増幅特性を推定できる。図-1.2.3.2はHRS013と広島-Gの常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の違いを考慮して、HRS013のサイト増幅特性を用いて広島-Gのサイト増幅特性を推定したものである。すなわち、HRS013のサイト増幅特性を、水平軸に関して2地点の常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク周波数比（およそ0.8Hz/1.1Hz）で比例配分している。推定結果と広島-Gの1次のピーク周波数はよく一致している。港湾においては0.3~2Hz程度の周波数帯の地震動の成分が耐震性能に大きく影響するため、1次のピーク周波数を正確に評価することが重要となる。

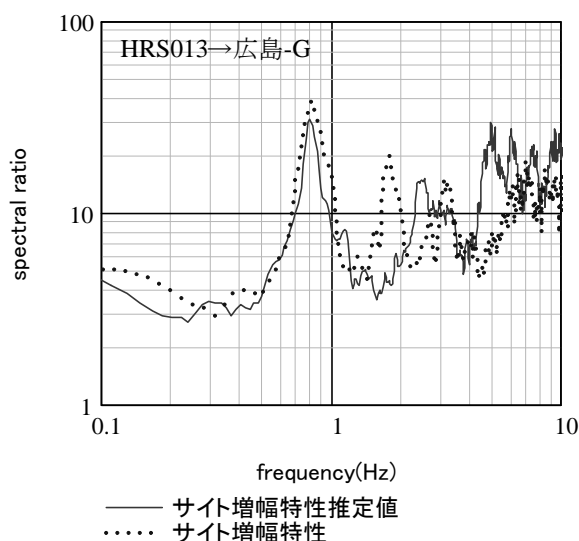


図-1.2.3.2 常時微動H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の推定例（振幅補正なし）

次に、周辺の強震観測地点と港湾でサイト増幅特性の1次のピーク振幅に違いがあると想定される場合、特に港湾におけるピーク振幅が周辺の強震観測地点のピーク振幅よりも高いと想定される場合は、上に述べた方法ではピーク周波数は精度良く評価できるものの、ピーク振幅は危険側の評価となる。図-1.2.3.2の例では、広島-Gの1次のピーク振幅は38.4であるが、推定されたサイト増幅特性の1次のピーク振幅は30.7であり、若干であるが危険側の推定となっている。

このため、常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク振幅に着目してサイト増幅特性の補正を行う方法が提案されている<sup>23-2)</sup>。この方法は、常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク振幅を利用するものである。常時微動が表面波のみにより構成されていると仮定すると、1次のピーク振幅と地震動の増幅倍率の間には相関性を認めたいが、少なくとも1次のピークにおいては実体波的なノイズの影響があるものと考え、2地点の常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク振幅比がサイト増幅特性の1次のピーク振幅比と一致すると考える。この仮定の妥当性については今後更に議論が必要であるが、複数の地域でこの関係が概ね成立することが示されている。具体的な方法は以下の通りである。

- (i) 上述の方法で、サイト増幅特性の第1次推定を行う（図-1.2.3.2の例と同じ推定値をまず求める）。
- (ii) 1次のピーク周波数以上の周波数帯については、サイト増幅特性第1次推定値に2地点の常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク振幅比（港湾/周辺の強震観測地点）を乗じる。
- (iii) 1次のピーク周波数よりも低周波数帯については、常時微動 H/V スペクトルの振幅比（港湾/周辺の強震観測地点）を乗じる。ここで、周辺の強震観測地点の常時微動 H/V スペクトルについては、サイト増幅特性の第1次推定値を求める時と同様の手順で、周波数軸に関して2地点の常時微動 H/V スペクトルの1次のピーク周波数比で比例配分したものを用いる。

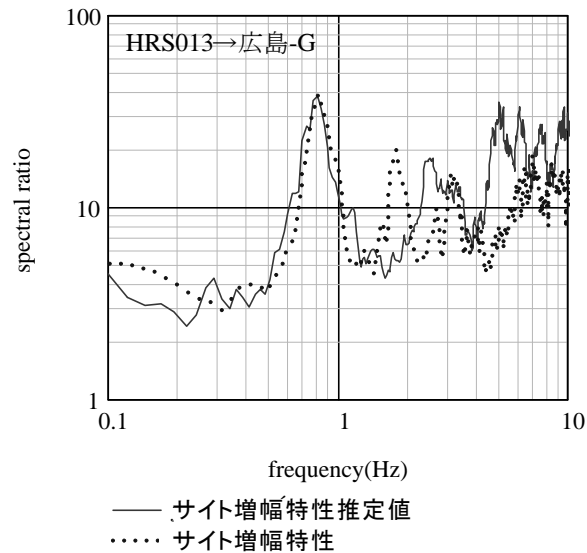


図-1.2.3.3 常時微動H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の推定例（振幅補正あり）

図-1.2.3.3にこの方法によるサイト増幅特性の推定例を示す。推定された1次のピーク振幅は37程度であり、より良い推定結果が得られているといえる。

この方法は現時点では上記のように港湾のサイト増幅特性のピーク振幅が周辺の強震観測地点のサイト増幅特性のピーク振幅と比較してかなり高いと想定される場合に限り適用が想定されるものであるため、適用には慎重な判断が必要である。本手法の適用においては、対象地域における本手法の適用性について確認を行うことが望ましい。

さらに、離島の港湾などで、堆積層が非常に薄いことが想定される場合に対して、サイト増幅特性の適用方法を検討した研究事例<sup>23-3)</sup>もあり、必要に応じて参照ができる。ただし、検証に用いた事例が豊富ではないことに注意が必要である。このため、本手法の適用においては、対象地域における本手法の適用性について確認を行うことが望ましい。

このほか、地震基盤が非常に深い場合などは、サイト増幅特性には明瞭なピークが見られない場合がある。そのようなサイトでは常時微動 H/V スペクトルの結果とサイト増幅特性の相関の議論を行うことは難しいと言える<sup>23-4)</sup>。

② 港湾と周辺の強震観測地点のサイト増幅特性の経験的關係を利用する方法<sup>22)</sup>

港湾と周辺の強震観測地点のサイト増幅特性の關係を統計解析した結果を用いる方法であり、①の常時微動観測結果を用いる方法のように新たに何らかの観測を行うことなく港湾のサイト増幅特性を推定する方法である。ただし、その場合の地震動の評価精度は地震観測に基づく場合と比較して大きく低下することに注意する

- 10)国土交通省港湾局，独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾計画のための地震動の方向性ハンドブック，CD-ROM，2003
- 11)菊地正幸，山中佳子：既往大地震の破壊過程=アスペリティの同定，サイスモ，5(7)，pp.6~7，2001
- 12)Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli : Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol.41, pp.51~63, 1975
- 13)工藤一嘉：強震動予測を中心とした地震工学研究のあゆみ，地震2，Vol.46，pp.151~159，1993
- 14)土田肇，井合進：建設技術者のための耐震工学，山海堂，1991
- 15)Kinoshita, S. : Kyoshin Net (K-net), Seim. Res. Lett., Vol. 69, pp.309~332, 1998
- 16)Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, S. : New strong-motion observation network: KiK-net, EOS. Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 329, 2000
- 17)大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
- 18)岩田知孝，入倉孝次郎：観測された地震波から震源特性，伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震2，Vol.39，pp.579~593，1986
- 19)山田雅行・野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンにおける岩盤サイトの選定に関する一考察，地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集（CD-ROM），2004
- 20)Aki, K. and P.B. Richards : Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books, 2002
- 21)野津厚，佐藤陽子，菅野高弘：羽田空港の地震動特性に関する研究（第2報）スペクトルインバージョンによるサイト特性，港湾技術研究所報告 Vol.42 No.2，pp.251~283，2003
- 22)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の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料 No.1112，2005
- 23)鶴来雅人，田居優，入倉孝次郎，古和田明：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討，地震2，Vol.50，pp.215~227，1997
- 23-1)長尾毅，平松和也，平井俊之，野津厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集，第22巻，pp.505-510，2006
- 23-2)長尾毅，山田雅行，野津厚：常時微動H/Vスペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集Vol.56A，pp.324-333，2010
- 23-3)長尾毅，山田雅行，野津厚：堆積層が薄い地点におけるサイト増幅特性の簡易評価法の検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学）[特]地震工学論文集，Vol.66，No.1，pp.1-11，2010
- 23-4)長尾毅，山田雅行，野津厚：深い盆地構造におけるサイト増幅特性に対する入射角の影響に関する研究，構造工学論文集Vol.54A，pp.247-255，2008
- 24)長尾毅，森下倫明，野津厚：レベル1地震動の評価におけるサイト特性の影響に関する研究，海洋開発論文集 第22巻，2006
- 25)長尾毅，平松和也，平井俊之，野津厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集 第22巻，2006
- 26)森伸一郎，俵司：常時微動測定による松山平野の三次元地盤構造の推定，構造工学論文集 Vol.47A，pp.529~538，2001
- 27)足立雅樹，川名太，長尾毅，紺野克昭：常時微動観測を用いた名古屋港のS波速度構造に関する検討，第27回地震工学研究発表会，CD-ROM，2003
- 28)山中浩明，山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築，物理探査 第55巻 第1号，pp.53~65，2002
- 29)佐藤智美，川瀬博，松島信一：微動とS波，P波， coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈，地震2，Vol.51，pp.291~318，1998
- 30)長尾毅，山田雅行，野津厚：深層地盤構造を考慮した臨海部のゾーニング手法に関する研究，海洋開発論文集 第21巻，pp.951~956，2005
- 31)長尾毅，山田雅行・野津厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集 No.801/I -73，pp.141-158，2005
- 32)宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885-1980年，地震研究所彙報 Vol.57，pp.401~463，1982
- 33)活断層研究会編：[新編]日本の活断層-分布図と資料，東京大学出版会，1991
- 34)中田高，今泉俊文編：活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会，2002

- 35)佐藤良輔編：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，1989
- 36)Yoshida, N. and S. Iai： Nonlinear site response and its evaluation and prediction, The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), Balkema, 1998
- 37)International Organization for Standardization: ISO23469, Bases for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005
- 38)Shnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed： SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California at Berkeley, 1972
- 39)Lysmer, J., T. Udaka, C.F. Tsai and H.B. Seed： FLUSH, A computer program of approximate 3-D analysis of