Seismic Spectrum in Kamioka Mine

JGW-1402971-v1
Takanori Sekiguchi

Nov. 9th, 2014

1 概要

KAGRA サイトにおける地面振動レベルを見積もるため、同じ神岡鉱山内の CLIO サイトに設置された地震計データの解析を行った。CLIO サイトには京都大学防災研究所と CLIO との共同研究により地震計が設置され地面振動レベルが常にモニターされている。CLIO は池ノ山の地下 1000 m に位置する一方、KAGRA のエンドテストマスは地下?00 m に設置される。他グループの地下サイトにおける地面振動解析結果によれば [1]、地表からの距離に影響されるのは主に 1 Hz 以上の地面振動レベルであり、0.2 Hz 付近に現れる micro seismic peak は地表からの距離にはほとんど影響されない。今回の解析では 0.1∼1 Hz の低周波地面振動レベルの年間での変動に特に注目する。以下に今回使用した地震計の設置場所を示す。

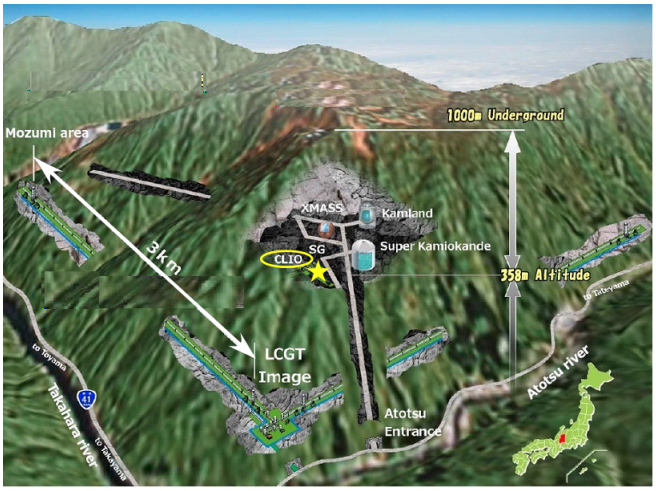

Figure 1: 地震計設置場所

2　地震計

地震計として使われたのは Guralp 社の CMG-3T である [2]。地震計は 10 mHz から 50 Hz にかけて地面速度に対してフラットな応答を示すように設定されている。ゲインの異なる 2 つの出力があり、速度に対する感度は高ゲイン出力で 22400 V/(m/sec)、低ゲイン出力で 1400 V/(m/sec) となっている。本解析では高ゲイン出力のデータを使用する。以下に高ゲイン出力における地震計の地面速度に対する応答関数を示す。

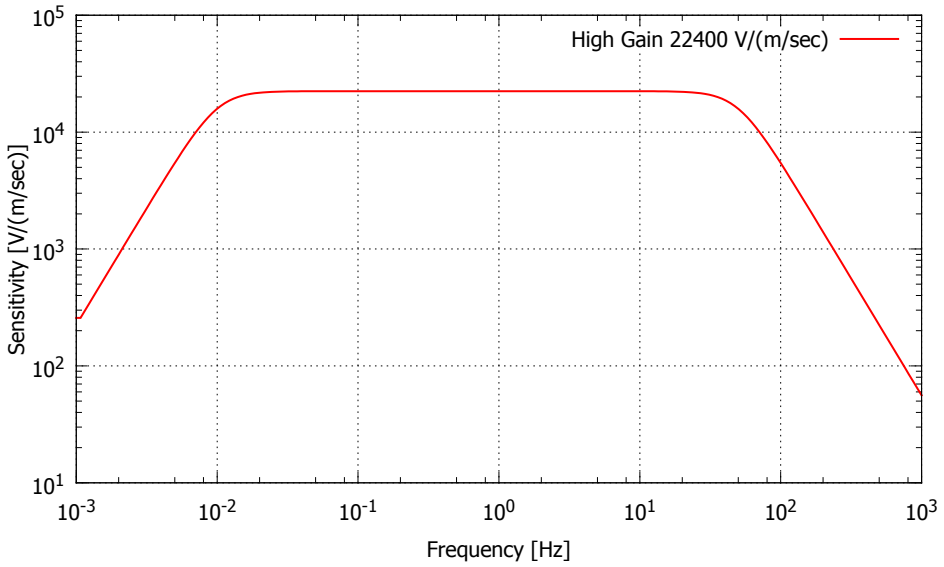

Figure 2: 地震計感度曲線

東西、南北、上下の 3 軸の地面振動に関する出力がそれぞれ 16 bit のデジタルデータに変換され保存される。ADC の入力電圧は ±5.12 V、サンプリング周波数は 200 Hz である。入力アナログ信号と出力デジタル信号の差によって生じる量子化雑音のパワースペクトル密度は、誤差の RMS 振幅を $\sigma_{\rm rms}$、サンプリング時間を $T_{\rm s}$ として $G_{\rm q}(f) = 2\sigma_{\rm rms}^2 T_{\rm s}$ であたえられる。LSB (Least Significant Bit) を Δ とし、常に $\pm\Delta/2$ 幅で量子化誤差が生じるとした理想的な場合、$\sigma_{\rm rms}^2 = \Delta^2/12$ となる [3]。今回の測定セットアップにおいてこの式で計算される量子化誤差は 4.5 μV/$\sqrt{\rm Hz}$、地面速度換算で 2.0×10^{-10} m/sec/$\sqrt{\rm Hz}$ となる。実際の ADC では内部雑音によって出力が揺らぐトランジション雑音が存在するため、生じる量子化誤差は $\pm\Delta/2$ よりも大きくなり雑音の振幅スペクトル密度は理想的な場合より数倍大きくなる。

3　典型的な出力データ

以下に CLIO サイトで測定された地震計データの典型的な時系列およびそのスペクトルを示す。スペクトル密度はバンド幅を 3 mHz(= 200 Hz/65536) とし、窓関数としてハニング窓を使用、50%オーバーラップを許し 1 時間分のデータの平均を取り算出した。地震計の

出力電圧の振幅スペクトル密度を見ると 2 Hz 以上は周波数に対してフラットな構造を示している。一般的に、地面振動の速度スペクトル密度は 1 Hz 以上では周波数に反比例する（加速度スペクトル密度が周波数に対しフラットになる）ことから、2 Hz 以上の測定は地震計もしくは ADC の雑音により制限されていることが予想される。

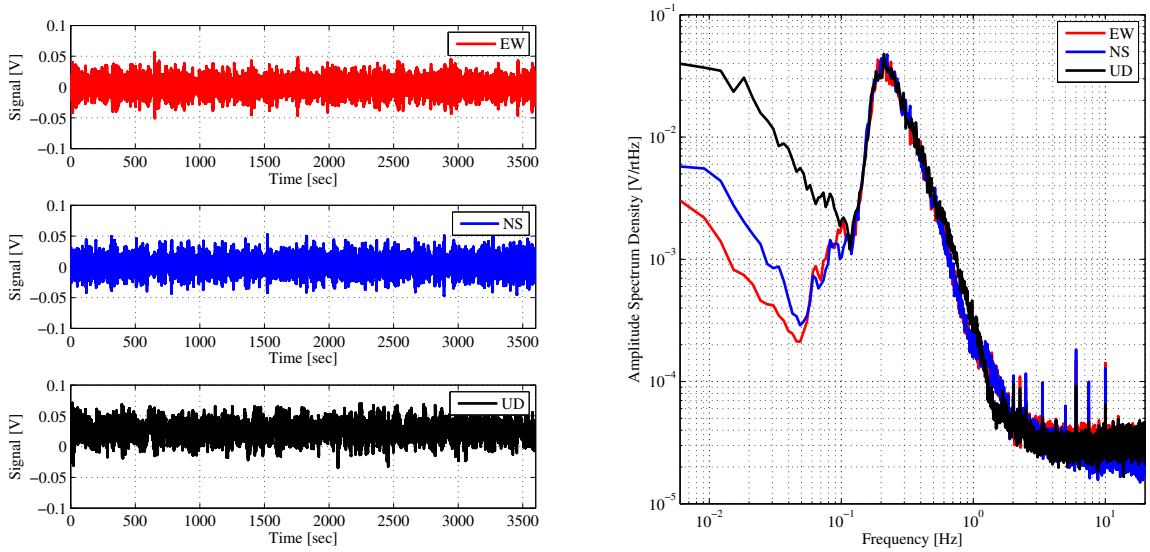

Figure 3: 典型的な地震計データの時系列およびスペクトル (2009 年 9 月 0 時 ∼1 時のデータ)

図 3 のスペクトルを地震計応答関数 (図 2) に基づいて地面振動の速度および変位スペクトルに変換したものが図 4 である。点線は J. Peterson による地面振動の NLNM(New Low Noise Model) および NHNM(New High Noise Model) である [4]。測定された地面振動スペクトルはそれらの範囲内に収まっていることがわかる。

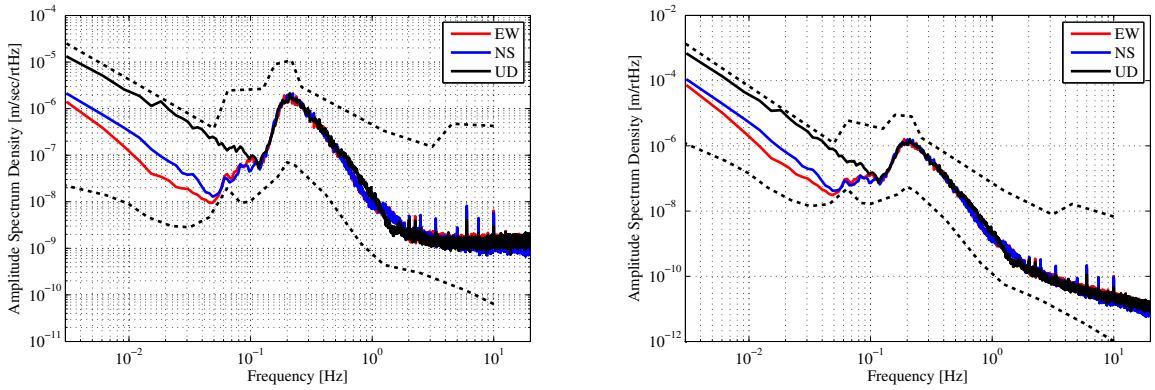

Figure 4: 図 3 のスペクトルより計算される地面振動の速度および変位スペクトル密度

4　長期データ解析

2011 年 3 月以降しばらくは東日本大地震の影響で地震が多発したため、それ以前の 2009 年 9 月から 2011 年 2 月にかけての 1 年半のデータの解析を行った。長期のデータを解析するにあたり、突発的な地震や電気雑音による影響を除去するため、地震計の出力が ±0.2 V を超えた場合のスペクトルは除去した（除去された地面振動データは全体の 0.1%程度である）。1 時間ごとにスペクトルの平均を取り 546 日 ×24 本のスペクトルを各自由度ごとに得た。各周波数ごとにスペクトル値を昇順に並べ、10%分位点から 90%分位点にかけてをスペクトル変動幅の目安とした。

図 5 に東西の地面振動変位スペクトルの解析結果を示す。赤い太線が各周波数ごとのスペクトルの中央値を表し、赤で塗り潰された領域は 10%分位点と 90%分位点に挟まれた領域を表す。青い点線は各周波数ごとの最小値および最大値を表す。10% - 90%分位の幅でスペクトルは 0.5 から 2 桁程度ばらつくことがわかる。

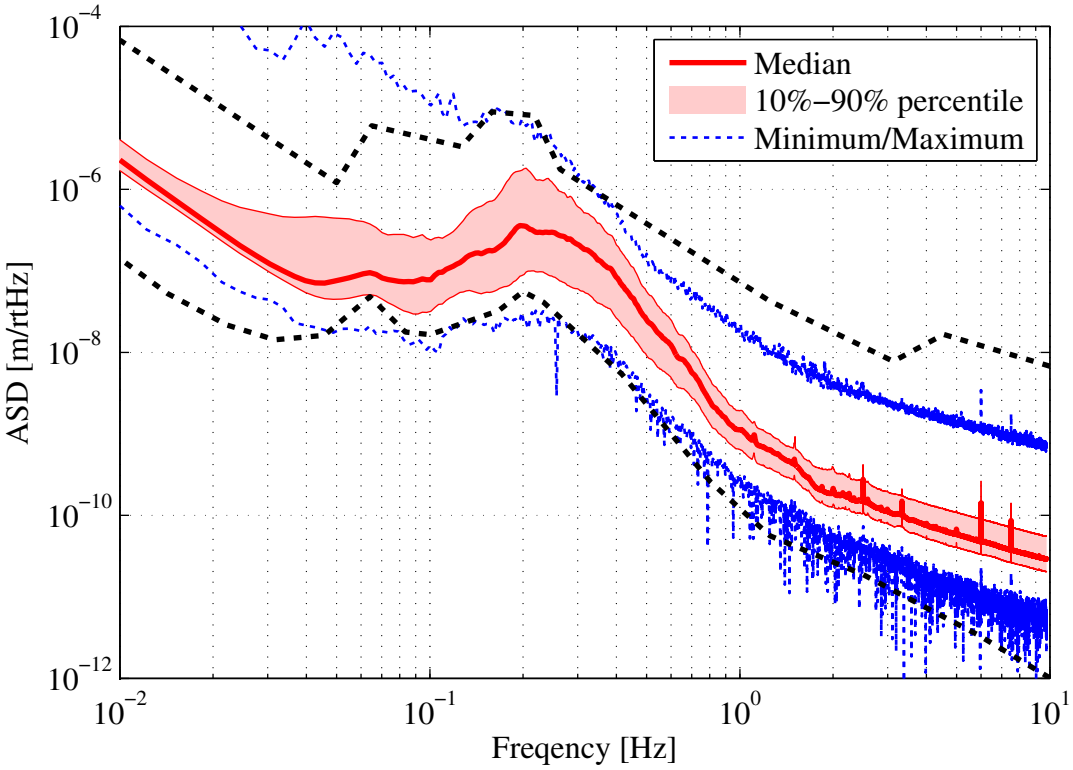

Figure 5: 東西の地面振動変位スペクトルの測定結果

図 6 に東西・南北・上下の 3 軸に関する地面振動スペクトルの測定結果を示す。0.1 Hz 以上の周波数では 3 軸ともほぼ同じ形状のスペクトルを持つことがわかる。0.1 Hz 以下の低周波ではそれぞれの軸に関して振幅の異なる変位スペクトル密度が観測されたが、どれも周波数に反比例した成分を持っており、おそらく地震計内の制御系の雑音に起因するものと思われる。特に上下の地震計データに関しては出力電圧の DC オフセットが比較的大

きく、それが低周波の雑音レベルに影響している可能性がある。

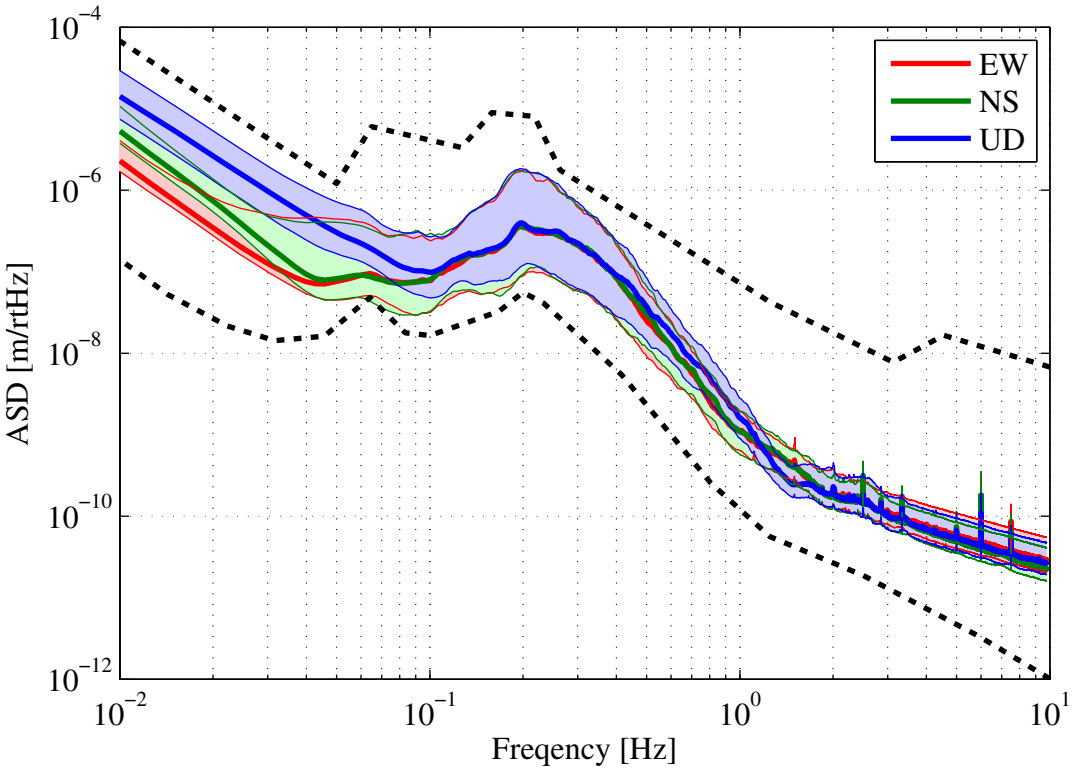

Figure 6: 東西・南北・上下の地面振動変位スペクトルの測定結果

5 他の地震計による測定結果との比較

地震計の雑音の影響を見るため、より高感度な地震計である Trillium 240 での測定結果との比較を図 7 に示す。Trillium 240 の結果は 2010 年 5 月 28 日から 6 月 2 日にかけて M. Beker が CLIO サイトで測定したものである。Trillium 240 を用いた測定では地震計およびデータ取得系の雑音は観測帯域内で信号に比べ十分低いことが評価されている [5]。赤線が今回長期データを解析するのに使用した CMG-3T による同時期での測定結果、緑線が Trillium 240 による測定結果であり、色の付いた領域は 10%分位点と 90%分位点に挟まれた領域である。

2 つの地震計による観測結果を比較すると、50 mHz から 1.5 Hz までの周波数領域では非常に良く一致していることがわかる。1.5 Hz 以上の周波数領域では Trillium 240 による測定結果の方が値が低く出ており、地面振動に典型的な周波数の 2 乗に反比例した変位スペクトル密度が表れている。このことから、2 Hz 以上の周波数で CMG-3T による測定結果が測定器の雑音に埋もれていることが改めて確認できる。50 mHz 以下についても Trillium 240 による測定値の方が低く出ており、CMG-3T の雑音の影響が見えていると思われる。

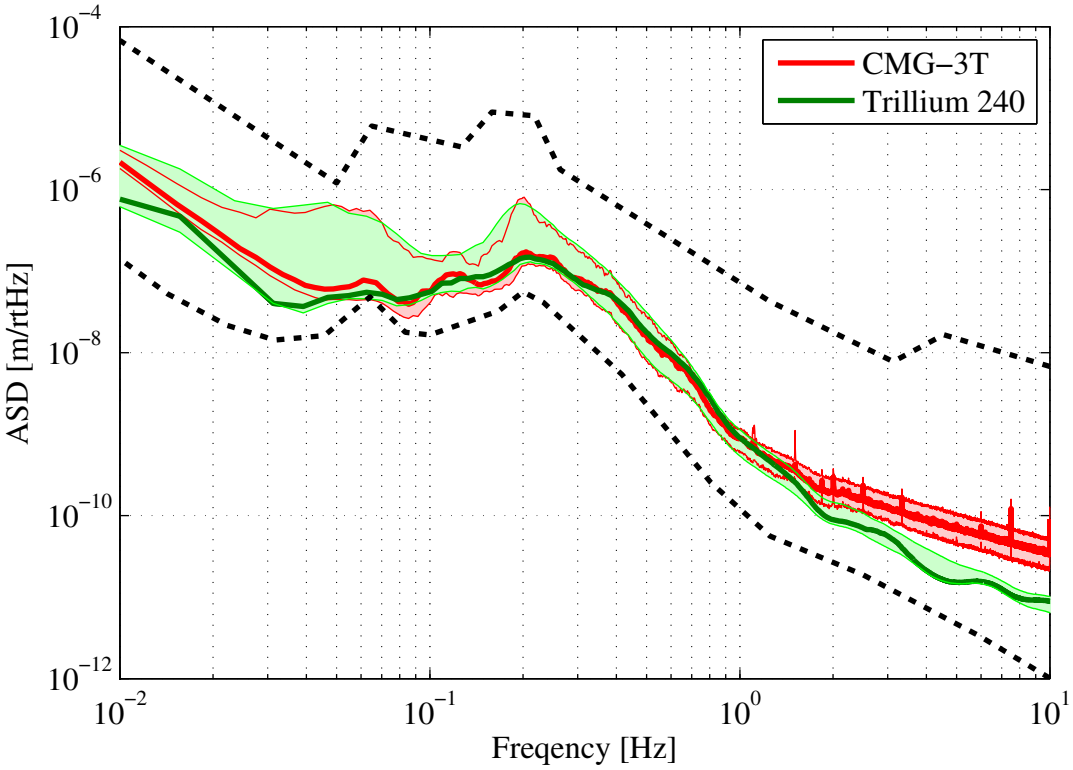

Figure 7: CMG-3T および Trillium 240 による東西の地面振動変位スペクトルの測定結果の比較（2010 年 5 月 28 日から 6 月 2 日までのデータ）

6 Micro-seismic Peak の変動

干渉計の安定動作を考える上で重要となる、0.2 Hz 付近の micro seismic peak に注目する。0.2 Hz における変位スペクトル密度の値のヒストグラムを図 8 に示す。青棒グラフが度数分布を表し、赤線は度数分布を積分して得られる累積頻度分布を表す。中央値は 0.3 μm/$\sqrt{\text{Hz}}$、10%分位点から 90%分位点までの値は 0.06 μm/$\sqrt{\text{Hz}}$ から 1.3 μm/$\sqrt{\text{Hz}}$ となっており、20 倍程度のバラつきがあることがわかる。

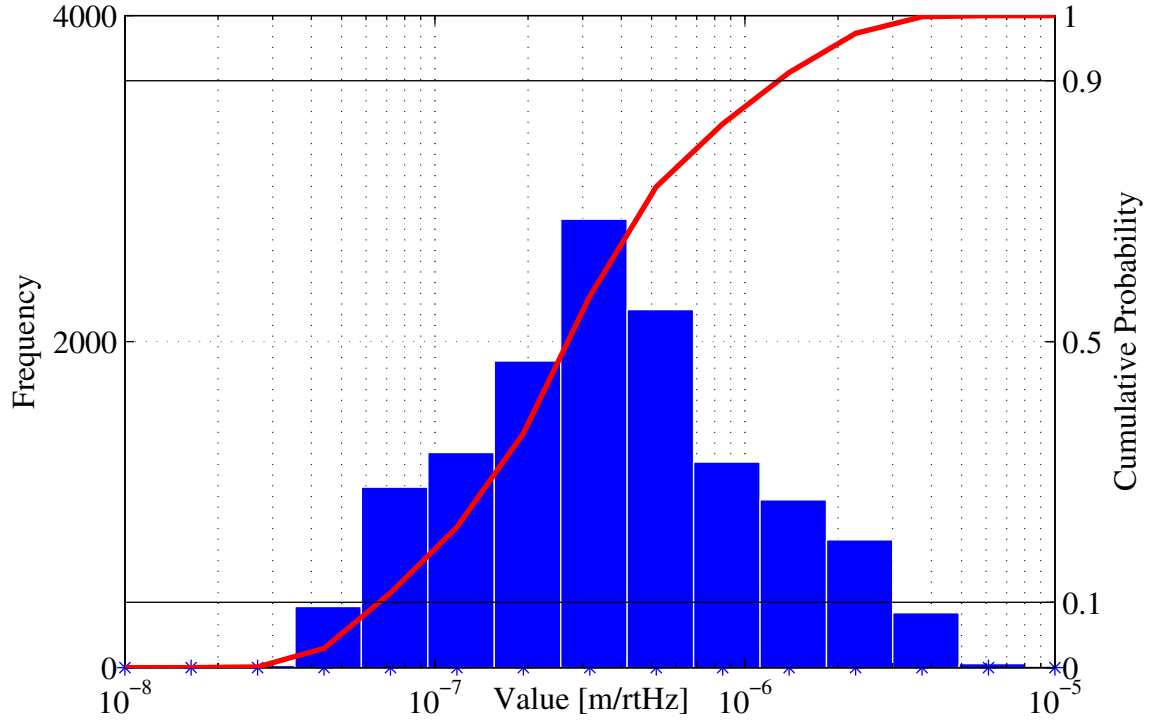

Figure 8: 0.2 Hz における地面振動の変位スペクトル密度の値のヒストグラム (青棒グラフが度数分布、赤線が累積頻度分布を表す)

図 5 のスペクトルを積分することで計算される中央値スペクトルの RMS 振幅は 0.13 μm、10%分位点と 90%分位点のスペクトルでは 0.04 μm、0.5 μm となり、RMS 振幅で見ても 10 倍程度のバラつきがあることが確認できる。

7 神岡の地面振動モデル

50 mHz 以下の地震計由来の雑音が最も小さかった東西に関する測定結果を元に、神岡の地面振動の High Noise Model (HNM)、Medium Noise Model (MNM)、Low Noise Model (LNM) を図 9 のように作成した。ただし 1.5 Hz 以上の周波数領域では変位スペクトル密度が周波数の 2 乗に反比例すると仮定した。今後地面振動によって生じる干渉計の鏡の振動の大きさを考える場合は原則これらのモデルを使用したいと考えている。

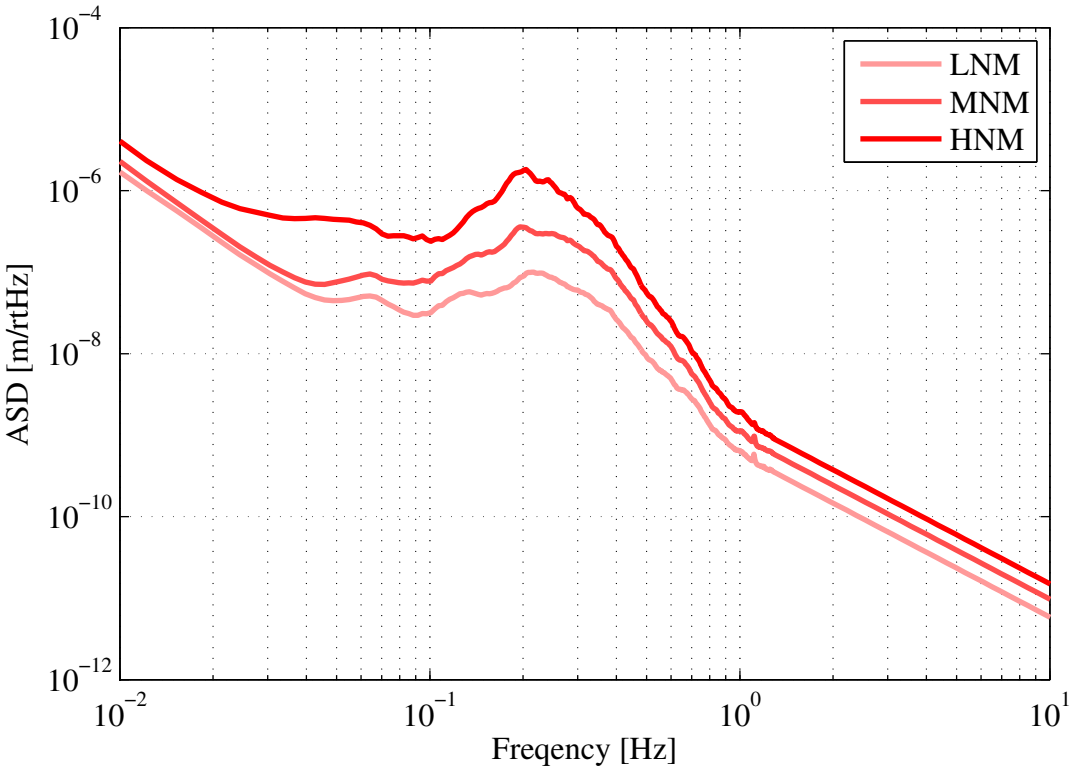

Figure 9: 神岡鉱山内の地面振動モデル

8 まとめ

CLIO サイトに常設されている地震計のデータを解析し神岡鉱山の地面振動スペクトルの統計的なデータを得た。測定された地面振動のスペクトルのうち 50 mHz から 1.5 Hz の周波数領域に関しては他の地震計の結果と整合性のあるデータが取れており神岡の地面振動を正しく測定できているものと思われ、それ以外の周波数についても地面振動の大きさに対する上限値を与えている。低周波の micro-seismic peak は年間で大きく変動し数十倍程度のばらつきがあることがわかった。測定データを元に神岡の地面振動モデルを作成し KAGRA における防振系のシミュレーション等で使えるデータを獲得した。

References

[1] J. Harms et al, "Characterization of the seismic environment at the Sanford Underground Laboratory, South Dakotas", Classical and Quantum Gravity, **27** (2010) 225011

[2] http://www.guralp.com/documents/MAN-030-0001.pdf

[3] 沼田健司「新アナログ信号光伝達システムの性能評価」http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tama/ifo/general_lib/ADDA/analog.pdf

[4] J. Peterson, "Observation and modeling of seismic background noise", US department of interior geological survey, open-file report 93-232 (1993)

[5] M. Beker, "Low frequency sensitivity of next generation gravitational wave detectors", Ph.D Thesis, Vrije Universiteit