

2015年ゴルカ地震の余震記録を用いた

ネパール・カトマンズ盆地の地盤震動特性の評価

迫原 尚也

1. はじめに

ネパールはユーラシアプレートとインドプレートのヒマラヤ衝突帯に位置し、過去に多くの地震被害を受けてきた。2015年4月25日にはネパール・ゴルカ地震 (M_w 7.8) が発生し、将来も中央ヒマラヤの地震空白域において巨大地震の発生が懸念されている¹⁾。さらに首都カトマンズは軟弱な湖成堆積盆地上に位置しており、長周期地震動の影響を受けやすい地域であるため、地盤震動特性を適切に評価することが重要となる。カトマンズ盆地では2011年より強震観測が実施され、Bijukchhen (2018)²⁾は強震記録と地質情報から3次元S波速度構造を構築した。また、Mori *et al.* (2020)³⁾は2015年ゴルカ地震の余震記録を用いて盆地内の8観測点の地盤増幅特性を評価し、さらに既往の強震動予測式を拡張する地震基盤上面深さをパラメータとする補正項を提案している。また、2016~2018年に新たに強震観測点が整備され、近年、強震記録の蓄積が進みつつある。

地下構造モデルの高度化のためには、新たな記録を用いた既存地下構造モデルの検証および改良が必須であり、本研究では、ネパール・カトマンズ内の強震観測点を対象に2015年ゴルカ地震の余震記録を用い、観測S波H/Vスペクトル比と拡散波動場理論⁴⁾に基づく理論スペクトル比の比較による3次元地下構造モデルの検証およびスペクトルインバージョン⁵⁾を用いた地盤震動特性の評価を行う。

2. データセット

カトマンズ盆地では2011年9月に北海道大学とTribhuvan大学との共同強震観測点が4地点、2015年5月~7月に2015年ゴルカ地震の臨時余震観測点が4地点、また、新たにSATREPSプロジェクトによる強震観測点が2016年11月に4地点、2017年11月に5地点、2018年5月に1地点設置され、カトマンズ盆地内の半径13kmにおける計18観測点で連続観測記録が得られている(図1)⁶⁾。このうちKTP、SNG、JHRは岩盤上、その他の観測点は堆積層上に位置する。解析には、

震央距離約100km以内、最大加速度が 100 cm/s^2 以下、5観測点以上で記録が得られている51個の地震(M_w 4.0~7.3)による観測記録を使用した。主にプレート境界で発生した2015年ゴルカ地震の余震である。なお、十分な記録が得られないKapanは解析対象から除いた。震源情報についてはアメリカ地質調査所(USGS)⁷⁾、Adhikari *et al.* (2015)⁸⁾、Ichiyana *et al.* (2016)⁹⁾による値を用いた。図1に本研究の対象地域および地質図¹⁰⁾と使用した地震の震央を示す。

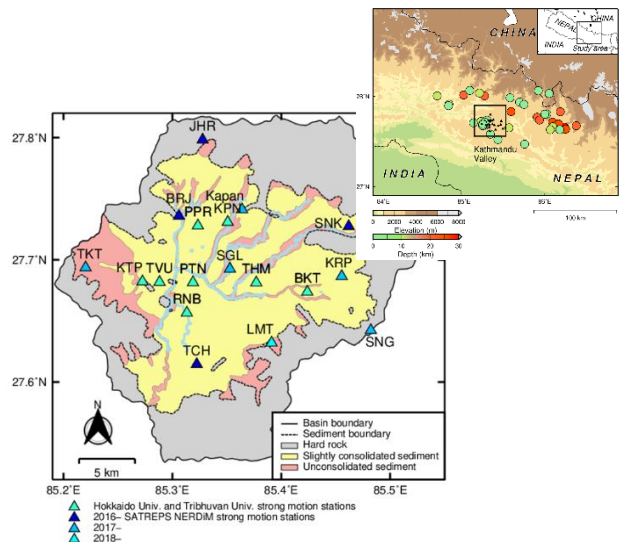


図1 本研究の対象地域および地質図¹⁰⁾(左)と使用した地震の震央(右)

3. 観測 H/V スペクトル比およびそれに基づく地下構造の検証

3.1 観測 H/V スペクトル比

観測 H/V スペクトル比は観測記録のS波初動到達から40.96秒間のフーリエスペクトルを求め、バンド幅0.1 HzのParzen windowを施した後、水平動成分の相乗平均を鉛直動成分で除して算出した。

図2に観測S波H/Vスペクトル比を示す。岩盤サイトのKTP、SNG、JHRで3.0 Hz程度、その他の堆積層上の観測点では、0.2~1.0 Hzの低周波数側にそれぞれピークを持つことが分かる。

3.2 拡散波動場理論に基づく S 波速度構造の同定

既存の地下構造モデルを検証するため、観測 S 波 H/V スペクトル比と拡散波動場理論に基づく理論値を比較する。Bijukchhen (2018)²⁾の3次元 S 波速度構造モデルは、北海道大学と Tribhuvan 大学との共同強震観測点 8 地点で強震記録による最適化が行われているが、2016 年以降に設置された新規観測点では行われていない。

拡散波動場理論に基づく理論地震動 H/V スペクトル (EHVR)⁴⁾は式(1)で算出した。

$$EHVR(\omega) = \frac{|H(\omega)|}{|V(\omega)|} = \sqrt{\frac{\alpha_H |TF_1(\omega)|}{\beta_H |TF_3(\omega)|}} \quad (1)$$

ここで、 α_H 、 β_H はそれぞれ基盤の P 波速度、S 波速度を表し、 $TF_1(\omega)$ 、 $TF_3(\omega)$ はそれぞれ地表における基盤からの S 波と P 波の伝達関数を表している。計算には堆積層において、層厚と V_s は Bijukchhen (2018)²⁾による観測点直下の値、 $V_p = 2.5 V_s$ ¹⁾、 $Q = 0.1 V_s$ 、地震基盤において層厚と V_p 、 V_s は Monsalve *et al.* (2006)¹²⁾による値、 $Q = 200$ ¹³⁾を用いた (表 1)。図 2 に新規観測点の速度構造モデルとそれに基づく理論 H/V スペクトル比を併せて示し、観測値と比較する。概ね両者は一致するが、SNG、JHR、TKT、KRP の盆地端部に位置する新規観測点 4 地点に関して、既存の地下構造モデルに基づく理論値の一次ピークが観測値よりも高周波数側に位置し、満足していない。

そこで、一致度の低い 4 観測点を対象に、拡散波動場理論に基づき、理論値が観測値を満足するように速度構造を同定した。Bijukchhen (2018)²⁾の観測点直下の S 波速度構造モデルを初期値とし、S 波速度は固定し、層厚だけ変化させ、理論値が観測値を満たすよう試行錯誤的に層厚を決定した。図 3 に再同定した新規観測点の速度構造モデルとそれに基づく理論 H/V スペクトル比を併せて示し、観測値と比較する。推定した速度構造モデルに基づく H/V スペクトル比の理論値と観測値は、概ね一致しており、既存速度構造モデルと比較して、工学的基盤以浅 ($V_s = 700$ m/s 以下) の層厚が SNG で 20 m、JHR で 30 m、TKT で 90 m 深くなり、KRP で 160 m 浅く求まった。

表 1 EHVR の算出に用いた値

V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q
500	200	1500	20
750	300	1600	30
875	350	1700	35
1000	400	1700	40
1250	500	2000	50
1750	700	2000	70
5500	3200	2400	200

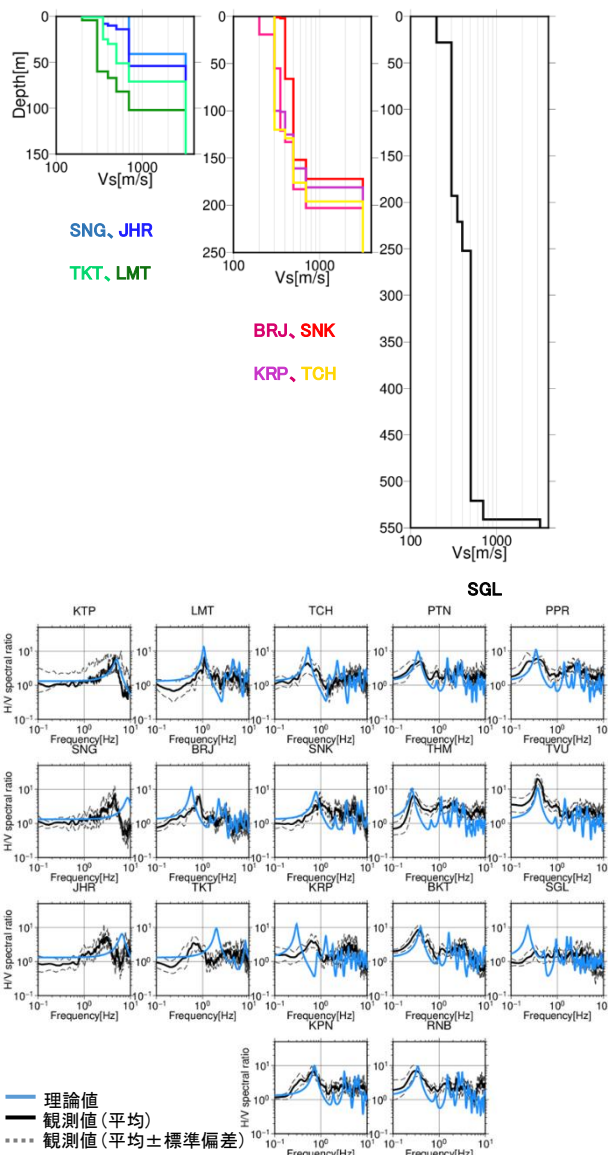


図 2 既存の速度構造モデル (上) とそれに基づく理論 H/V スペクトル比と観測値の比較 (下)

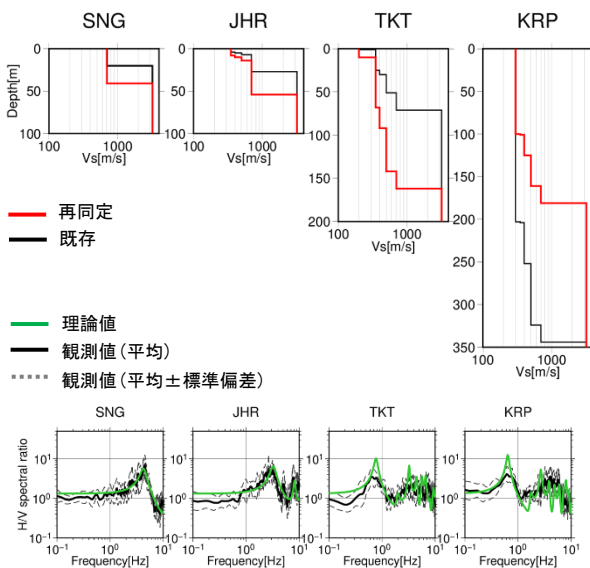
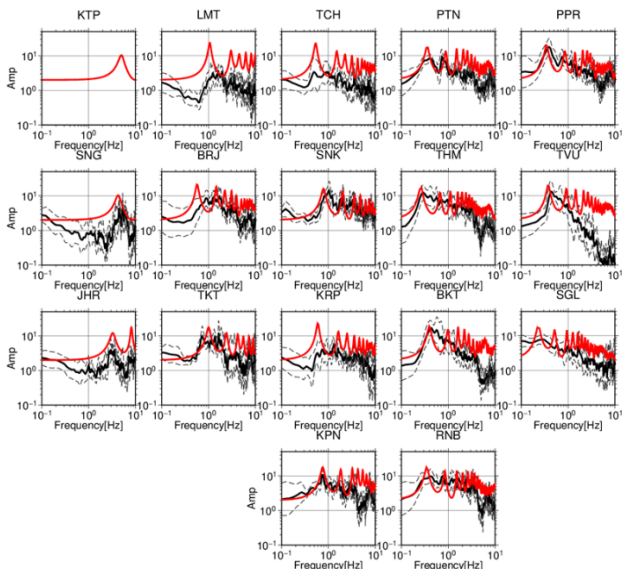


図 3 再同定した速度構造モデル (上) とそれに基づく理論 H/V スペクトル比と観測値の比較 (下)

4. 1次元地盤増幅率の検討

まず、推定された4地点の地下構造モデルおよび、13地点の直下の既存地下構造モデルから、1次元重複反射理論¹⁴⁾に基づき地盤増幅率を算出した。密度、Q値については、3.2節と同様に設定した。

次に、 $M_w 4.0$ 以上、最大加速度 100 cm/s^2 以下かつ震央距離に対する震源深さが大きい地震記録から、水平動の Transverse 成分の岩盤サイト KTP に対する堆積層サイトのスペクトル比の算出を行った。解析区間は S 波初動到達後、40.96 秒間のフーリエスペクトルを求め、バンド幅 0.1 Hz の Parzen window で平滑化した。1次元地盤増幅率とスペクトル比の比較の一例を図4に示す。高周波数側において、1次元地盤増幅率に比べて KTP のサイト特性が影響し、スペクトル比が小さくなる傾向があるが両者の一次ピークは概ね一致する。



— 岩盤サイトKTPに対する堆積層サイトのスペクトル比(平均)
 --- 岩盤サイトKTPに対する堆積層サイトのスペクトル比(平均±標準偏差)
 — 1次元理論地盤増幅率

図4 1次元地盤増幅率とKTPに対する堆積層サイトのスペクトル比

5. スペクトルインバージョン

5.1 解析手法と解析条件

スペクトルインバージョン(岩田・入倉、1986)⁵⁾とは、複数の地点で観測された複数の地震による地震記録に対して一種の回帰分析を適用し、震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性を分離するための手法である。 i 個の地震が j 個の観測点全てで観測されたとすると、 j 番目の観測点で観測される i 番目の地震波スペクトル $O_{ij}(f)$ は式(2)で表すことができる。

$$O_{ij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} \cdot S_i(f) \cdot G_j(f) \cdot \exp(-\pi f R_{ij} / Q(f) V_s) \quad (2)$$

ここで、 R_{ij} は i 番目地震の j 番目観測点に対する震源距離、 $S_i(f)$ は i 地震の震源特性、 $Q(f)$ は周波数ごとに定義された減衰定数、 $G_j(f)$ は j 地点の地盤増幅特性、 V_s は伝播経路における平均的なS波速度であり、Monsalve *et al.* (2006)¹²⁾を参考に $V_s = 3.4 \text{ km/s}$ とした。式(2)を周波数 f ごとに解くとき、震源特性 $S(f)$ と地盤増幅特性 $G(f)$ の間にはトレードオフの関係があるため、拘束条件が必要となる。本研究では、4章で求めた、岩盤サイトであるKTPおよび2015年ゴルカ地震の臨時余震観測点のKPN、計2地点の1次元地盤増幅率を用いた。

解析に用いるフーリエ振幅スペクトルは水平2成分をベクトル合成したものとし、解析区間については加速度波形から目視により読み取ったS波初動到達時刻から40.96秒で行った。スペクトルの解析対象周波数はノイズの影響を考慮して0.2~10.0 Hzとし、平滑化にはバンド幅0.1 HzのParzen windowを用いた。

5.2 解析結果

得られた51地震の震源特性 $S(f)$ 、1個の $Q(f)$ 、17観測点の地盤増幅率 $G(f)$ を図5、6に示す。

震源特性(図5左)は、0.4 Hz以上の高周波数側ではBrune (1970)の ω^{-2} モデル¹⁵⁾と一致するが、0.4 Hz以下の低周波数側で震源距離が大きい地震ほど ω^{-2} モデルに従わなくなる傾向があった。

$Q(f)$ (図5右)は、0.4 Hz以下にピークを有するため、0.4~10.0 Hzの周波数範囲において $Q(f) = Q_0 f^n$ の関数形で近似すると、 $Q(f) = 70 f^{1.15}$ (0.4~10.0 Hz)である。東ヒマラヤおよび南チベット地域の値¹⁶⁾と比較すると、本研究で、推定された値は概ね一致する結果となった。

地盤増幅率(図6)について、新規観測点の0.2 Hz付近にあるピークはノイズの影響によるものだと考えられるが、0.4 Hz以上の周波数帯において、1次元理論地盤増幅率と概ね一致していることが分かる。

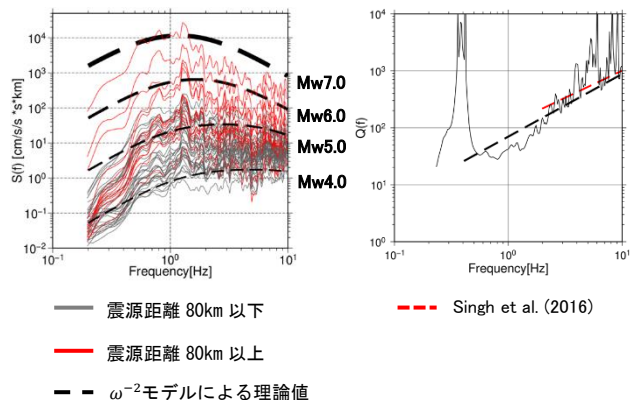


図5 推定された $S(f)$ (左)と $Q(f)$ (右)

6. 推定された地盤増幅特性の検討

推定された地盤増幅特性についてカトマンズの地質情報¹⁰⁾(図1)とBijukchhen(2018)²⁾によるS波速度構造および新たに同定した速度構造を用いて考察する。

SNG、JHRはどちらも岩盤上に位置しているが、表層のS波速度はJHRのほうが小さいため、SNGよりもやや長周期側で増幅されることが分かった。LMT、TKTは未固結堆積物上に位置しており、S波速度構造も類似しているが推定結果は、1.0 Hzの卓越周波数においてTKTの方が約10倍となり、大きく増幅される結果となった。

BRJ、TCH、KRP、SNKは半固結堆積物上に位置し、層厚が30 m以浅のS波速度は、BRJ、TCH、KRP、SNKの順に速いが、0.5 Hzの卓越周波数における増幅率はTCHが最も小さい結果となった。SGLについてはH/Vスペクトル比からピークを読み取れなかったが0.3 Hz程度で約10倍となり、堆積層が深い盆地中央部の半固結堆積物に位置することから長周期側が増幅されると推測される。

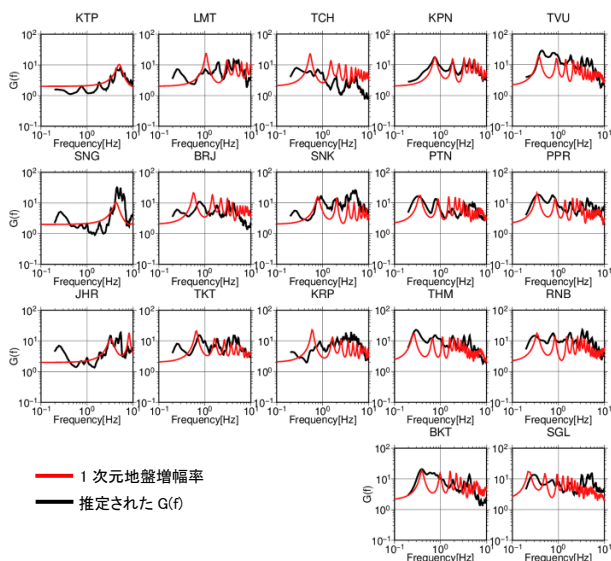


図6 推定された地盤増幅率

7. まとめ

本研究では、ネパール・カトマンズ内の強震観測点を対象に2015年ゴルカ地震の余震記録を用い、観測S波H/Vスペクトル比と拡散波動場理論に基づく理論スペクトル比の比較による3次元地下構造モデルの検証およびスペクトルインバージョンを用いた地盤震動特性の評価をした。その結果を以下にまとめる。

- 拡散波動場理論に基づき、新たに推定した4観測点のS波速度構造は、工学的基盤以浅($V_s = 700$ m/s以下)において、層厚が既存速度構造モデルよりSNGで20 m、JHRで30 m、TKTで90 m深くなり、KRPで160 m浅く求まった。

- 観測S波H/Vスペクトル比と拡散波動場理論に基づく理論スペクトル比の比較から、新たに推定した4観測点、およびその他の既存の速度構造モデルは概ね妥当であるといえる。

- スペクトルインバージョンにより推定された震源スペクトルは、震源距離の大きいものは低周波側において ω^{-2} モデルによる理論値に従わず、今後さらなる検討が必要である。

- 推定された Q_s については0.4~10.0 Hzの周波数範囲で $Q(f) = 70f^{1.15}$ と近似され、東ヒマラヤおよび南チベット地域の値と比較すると、概ね一致する結果となった。

- S波速度構造に基づく1次元理論地盤増幅率とスペクトルインバージョンによるサイト特性の評価からネパール・カトマンズ盆地における新規観測点の地盤増幅特性は、岩盤上の観測点であるJHR、SNGで3.0 Hz、未固結堆積物上の観測点であるLMT、TKTは1.0 Hz、半固結堆積物上の観測点であるBRJ、TCH、KRP、SNKは0.5 Hz、堆積層が深い盆地中央部の半固結堆積物に位置するSGLでは0.3 Hzで増幅されることが分かった。

参考文献

- 1) Bilham, R. and Wallace, K. : Future Mw >8 earthquakes in the Himalaya : implications from the 26th Dec 2004 Mw = 9.0 earthquake on India's eastern plate margin. Geological Survey of India Special Publication, Vol. 85, pp. 1-14, 2005
- 2) Bijukchhen, S.M. : Construction of 3-D Velocity Structure Model of the Kathmandu Basin, Nepal, based on Geological Information and Earthquake Ground Motion Records. PhD Thesis, Hokkaido University, 2018
- 3) Mori, T., Shigefuji, M., Bijukchhen, S.M., Kanno, T. and Takai, N. : Ground motion prediction equation for the Kathmandu Valley, Nepal based on strong motion records during the 2015 Gorkha Nepal earthquake sequence, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 135, No. 106208, 2020
- 4) Nagashima, F., Matsushima, S., Kawase, H., Sanchez-Sesma, F.J., Hayakawa, T., Satoh, T. and Oshima, M. : Application of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Ground Motions to Identify Subsurface Structures at and Around the K-NET Site in Tohoku, Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 5, pp. 2288-2302, 2014
- 5) 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、第2巻、第39巻、pp. 579-593, 1986
- 6) Takai, N., Shigefuji, M., Bijukchhen, S.M., Koketsu, K., Miyake, H., Bhattarai, M., Timisina, C. and Singh, S. : Strong Motion Observation Network in the Kathmandu Valley, Nepal, Japan Geoscience Union Meeting, SSS14-P21, 2018
- 7) U.S. Geological Survey : <http://www.strongmotioncenter.org>, Accessed 20 July 2020
- 8) Adhikari, L.B., Gautam, U.P., Koirala, B.P., Bhattarai, M., Kandel, T., Gupta, R.M., Timisina, C., Maharjan, K., Dahal, T., Hoste-Colomer, R., Cano, Y., Dandine, M., Guilhem, A., Merrer, S., Roudil, P. and Bollinger, L. : The aftershock sequence of the 2015 April 25 Gorkha Nepal earthquake, Geophys. J. Int., Vol. 203, pp.2119-2124, 2015
- 9) Ichyanagi, M., Takai, N., Shigefuji, M., Sasatani, T., Rajaura, S., Dhital, M.R. and Takahashi, H. : Aftershock activity of the 2015 Gorkha, Nepal earthquake determined using the Kathmandu strong motion seismographic array, Earth Planets Space, Vol. 68, No. 25, 2016
- 10) Shrestha, O., Koirala, A., Pradhan, U., Pradhan, P. and Karmacharya, R. : Engineering and environmental geological map of the Kathmandu valley, Department of Mines and Geology, Kathmandu, 1998
- 11) Borah, K., Kanna, N., Rai, S.S. and Prakasam, K.S. : Sediment thickness beneath the Indo-Gangetic Plain and Siwalik Himalaya inferred from receiver function modelling Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 99, pp. 41-56, 2015
- 12) Monsalve, A., Sheehan, A., Schulte-Pelkum, V., Rajaura, S., Pandey, M.R. and Wu, F. : Seismicity and one-dimensional velocity structure of the Himalayan collision zone: Earthquakes in the crust and upper mantle, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, pp. 1-19, 2006
- 13) Grandin, R., Vallée, M., Satriano, C., Lacassin, R., Klinger, Y., Simoes, M. and Bollinger, L. : Rupture process of the Mw = 7.9 2015 Gorkha earthquake (Nepal): insights into Himalayan megathrust segmentation, Geophysical Research Letters, Vol. 42, No. 20, pp. 8373-8382, 2015
- 14) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 72-12, pp. 88, 1972
- 15) Brune, J.N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009, 1970
- 16) Sagar, S., Chandrani, S., Rahui, B., Sagarika, M. and Himanshu, S. : Attenuation characteristics in eastern Himalaya and southern Tibetan Plateau : Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 257, pp. 48-56, 2016