

レシーバー関数解析による

ネパール・カトマンズ盆地の深部地盤構造の推定に関する研究

安部 良

1. はじめに

ネパールの首都カトマンズを有するカトマンズ盆地は、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。カトマンズ盆地は軟弱な湖成堆積物が厚く堆積し、近地の活断層による地震被害に留まらず、遠地の大地震時においても被害が懸念される。2015年4月25日6:11 (UTC) にカトマンズの北西部ゴルカ郡で発生した2015年ゴルカ地震 (Mw 7.8) では、カトマンズで、1,739人が死傷し、歴史的建造物を含む、約13%の建物が全壊した¹⁾。カトマンズ盆地内の堆積層上で観測された地震動は周期3~5秒の長周期地震動が卓越しており、深部地盤構造による影響が指摘されている²⁾。また、近年ネパールはカトマンズにおける爆発的な人口増加とそれに伴う建造物の無秩序な増加により、都市の脆弱性が高まっており、将来起こりうる地震災害を軽減

するためには、地震動評価に資するカトマンズ盆地内の地下構造モデルの構築が必要不可欠である。

本研究では、カトマンズ盆地の高精度なS波速度構造モデル構築を目的として、盆地内の8観測点を対象に、2015年ゴルカ地震の余震記録からレシーバー関数を求め、観測点直下のS波速度構造を推定する。

2. データセット

図1に本研究の対象地域と使用した地震の震央と規模を示す。解析には、カトマンズ盆地に設置された北海道大学とトリブバン大学との共同観測網および2015年ゴルカ地震の臨時観測網による8観測点の加速度記録を使用した。この内KTPは岩盤上に位置し、その他の観測点(TVU、PTN、THM、BKT、RNB、PPR、KPN)は盆地内の堆積層上に位置する。本研究では震源情報は、USGS³⁾、Adhikari et al. (2015)⁴⁾、Ichiyanagi et al. (2016)⁵⁾から引用し、同図に示す概ね震央距離100km以内における40個の地震 (M2.3~7.3) による地震記録を使用した。地殻の速度構造⁶⁾を用いて、スネルの法則によって推定された地震基盤への入射角は観測点間に大きな差はなく、地震間で約5~90度であった。

3. レシーバー関数解析

レシーバー関数とは、Langston (1979)⁷⁾によって考案されたものであり、P波初動時間を始点として、Radial成分をVertical成分でデコンポリューション処理することによって求められる。レシーバー関数のピーク時間はPS変換波の位相を示しており、PS変換波と直達P波の到達時間差 (PS-P時間) を推定できる。PS-P時間は地震基盤以浅の速度構造に関係することから、深部速度構造の推定に用いられる^{8),9)}。

レシーバー関数の算出は、小林・他 (1998)⁸⁾に準拠した。まず観測記録をRadial成分およびTransverse成分に変換し、P波初動より3秒間の後半1秒間にCosine型テーパを施し、フーリエ変換する。次に、Vertical成分に対するRadial成分の複素フーリエ係数比を求め、1~10 HzのCosine型テーパを両端に施す。その後、三浦・他 (2014)⁹⁾を参考に全周波数の振幅を1.0として位相情報のみを抽出し、フーリエ逆変換することでレシーバー関数を算出する。さらに、各観測点のレシ

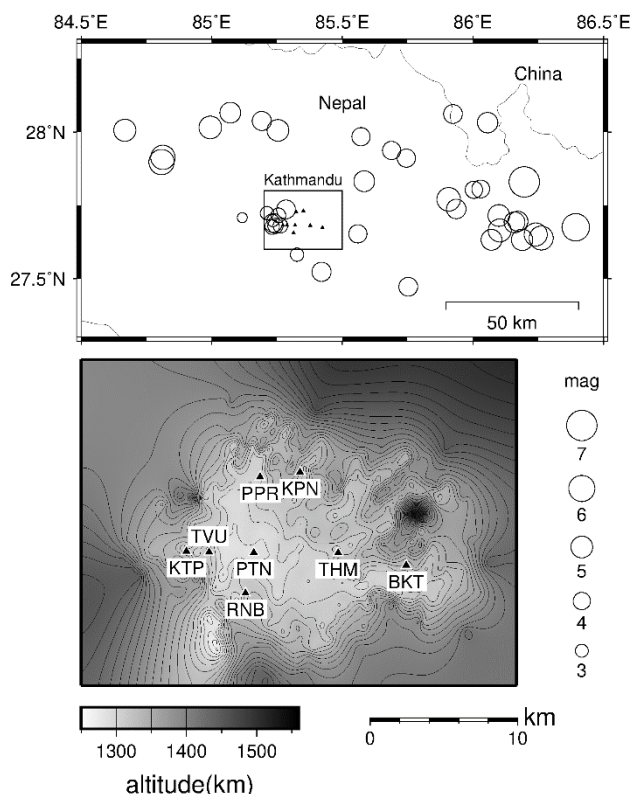


図1 本研究対象地域における使用した地震 (上) およびカトマンズ盆地内の8つの観測点 (下)

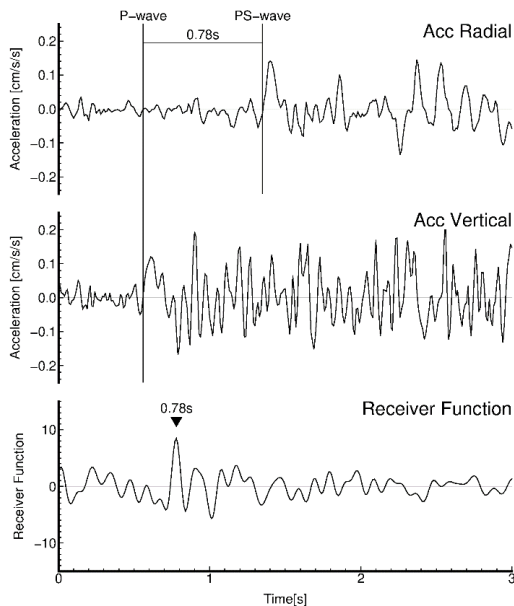


図2 PTNの観測加速度波形（上・中）とレシーバー関数（下）

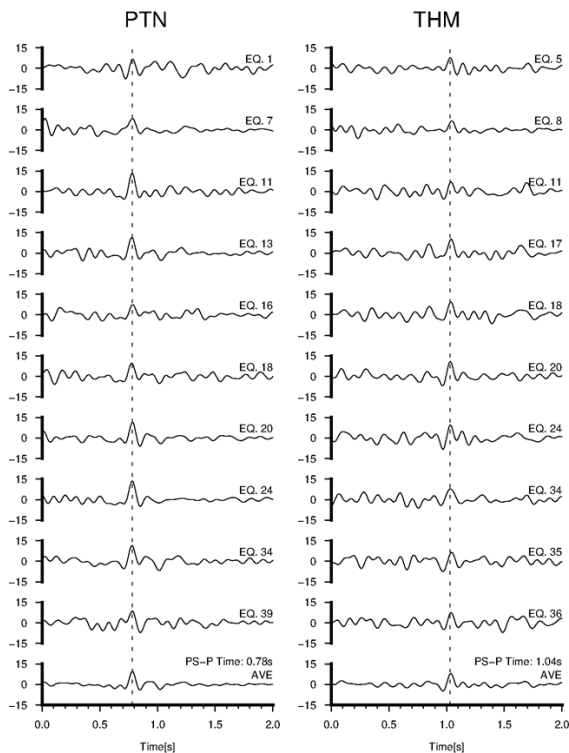


図3 強震記録から算出したレシーバー関数の例、点線は各観測点におけるPS-P時間

レシーバー関数のPS-P時間の平均を取り、平均から最も差の大きい記録を除外して平均をとる作業を差が0.01秒になるまで繰り返した。

図2に一例として、PTNで観測された2015年5月13日6:26(UTC)に発生した地震(M4.8、震源深さ32.3km)の加速度記録から読み取ったPS-P時間と算出したレシーバー関数の比較を示す。加速度記録によ

るPS-P時間、レシーバー関数のピーク時間は、共に0.78秒であり、両者が対応していることが分かる。

図3にPTNとTHMのレシーバー関数の一例を示す。個々の地震におけるレシーバー関数はランダムな位相を有するが、図の最下部に示す平均レシーバー関数ではランダムな成分が減少し、明瞭な位相が現れているのが分かる。

図4に各観測点における強震記録から算出した観測レシーバー関数、図5にPS-P時間の空間分布を示す。観測レシーバー関数のPS-P時間は岩盤サイトで0.03秒、堆積層サイトで平均して約0.7秒であり、堆積層サイトの中でも最大で0.66秒の差があり盆地内で大きく異なる。

Bijukchhen et al. (2017)¹⁰では、ボーリングデータや地質図、重力図の地盤構造情報を基に構築したS波速度構造を、中小地震による観測波形を説明するようにチューニングし、各観測点におけるS波速度構造を推定している。ここから算出した理論レシーバー関数も図4に示す。なお、理論レシーバー関数はHaskell (1962)¹¹によるP-SV波の1次元重複反射理論に基づき算出した。なお、P波速度と密度はLudwig et al. (1970)¹²によってS波速度から算出し、入射角は使用した地震の平均値をそれぞれ用いた。TVU、BKT、RNB、KPNにおいて観測レシーバー関数はBijukchhen et al. (2017)の理論レシーバー関数と比較して約0.1秒の差がある。このうちBKTは観測レシーバー関数より理論レシーバー関数のピーク時間が長く、その他の観測点は短い。Bijukchhen et al. (2017)の構造を元に地震基盤からのPS-P時間を算出した結果、図4に示すPS-P時間と一致しており、本研究で算出したレシーバー関数のPS-P時間は地震基盤深度と対応していることがわかる。KTPとTVUは約1.5kmの距離に位置するがPS-P時間には0.75秒の差があり速度構造が大きく変化していることが推察される。

4. レシーバー関数の逆解析によるカトマンズ盆地の深部地盤構造の推定

観測点直下の1次元S波速度構造を推定するために、遺伝的アルゴリズム¹³を用いてレシーバー関数を逆解析した。S波速度と層厚の間にはトレードオフが発生することがあるため、S波速度はBijukchhen et al. (2017)による各層の値を使用し、層厚のみを探索パラメータとして逆解析を行った。層厚の探索範囲はBijukchhen et al. (2017)の値の±50%とした。また、逆解析における入射角は、使用した地震の平均を用いた。逆解析では、離散化ビット数を6bit、個体数を40個

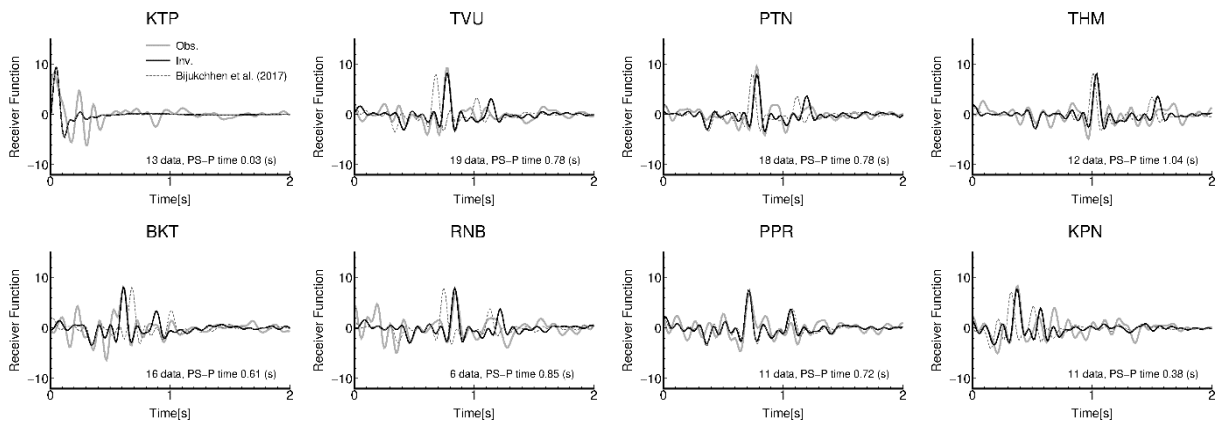


図4 観測レシーバー関数および Bijukchhen et al. (2017)と推定した速度構造に基づく理論レシーバー関数

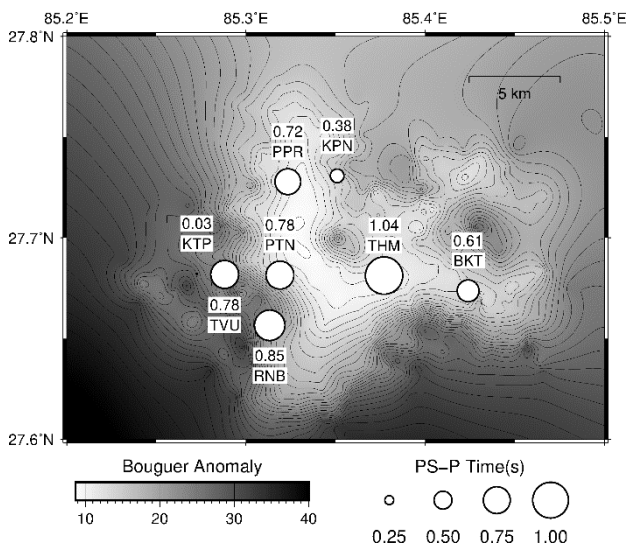


図5 重力図と PS-P 時間の空間分布

体、世代数を 150 世代、交差率を 70%として 20 回の試行を行い、誤差が最小のモデルを最適解とした。

図 4 に推定した速度構造による理論レシーバー関数 (Inv.) も同時に示す。理論レシーバー関数は観測レシーバー関数のピーク時間を良く再現している。

図 6 に逆解析により得られたカトマンズ盆地内の 8 地点における S 波速度構造と Bijukchhen et al. (2017)の S 波速度構造の比較を示す。PTN と BKT では地震基盤深度が 50 m 程度異なる。

5. 推定深部地盤構造と既往研究との比較

図 7 に岩盤サイト KTP に対する堆積層サイトの観測スペクトル比と、推定した S 波速度構造と Bijukchhen et al. (2017)の S 波速度構造モデルに基づく SH 波の 1 次元地盤増幅率の比較を示す。なお、観測スペクトル比は、2015 年 5 月 12 日 7:05 (UTC) に発生した M_w 7.3 の最大余震とその約 30 分後に発生した M_w 6.3 の地震の強震記録の S 波部分 40.96 秒間の Transverse 成分の加速度フーリエスペクトルにバンド

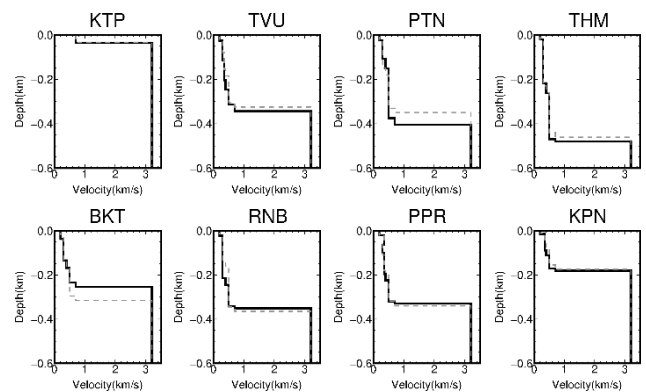


図6 逆解析結果より得られた S 波速度構造 (黒色: 実線) と Bijukchhen et al. (2017) (灰色: 点線) との比較

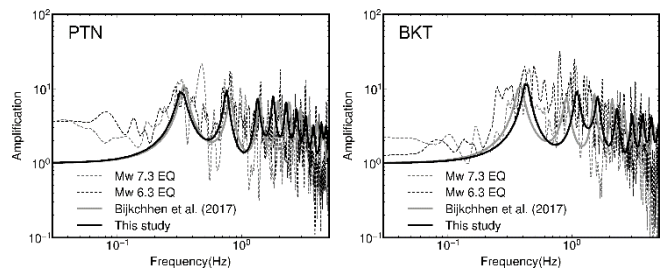


図7 1次元地盤増幅率の比較

幅 0.05 Hz の Parzen-window をかけて算出した。地盤増幅率は Haskell (1960)¹⁴⁾による SH 波の 1 次元重複反射理論により算出した。ここで、密度は Ludwig et al. (1970)により S 波速度から算出し、S 波の Q 値は S 波速度 (m/s) の 10 分の 1 とした。各観測点で低周波数側のピーク周波数が観測とよく対応している。また、Bijukchhen et al. (2017)による地盤構造モデルと地震基盤深度が 50 m 異なる PTN と BKT において、PTN では観測と比較して低周波側のピークが Bijukchhen et al. (2017)とほぼ同等の値を示し、BKT では本研究によりモデルが改善されている。

図 5 に Moribayashi and Maruo (1980)¹⁵⁾による重力図とレシーバー関数から読み取れる PS-P 時間の関係を

示す。重力異常値が小さいほど、PS-P時間は値が長いほど、それぞれ地震基盤深度が深いことを示しており、両者が対応していることが分かる。

図8に本研究により推定されたS波速度構造とMoribayashi and Maruo (1980)の重力観測結果に基づく地震基盤上面深度との比較を示す。LINE Aでは、TVUやBKTで基盤深度に不一致が見られるが、どちらもTHMを谷とした盆地形状を上手く再現できている。LINE BやLINE Cでも大局的な傾向が一致している。

6. まとめ

本研究では、2015年ゴルカ地震の余震記録からレーシーバー関数を求め、逆解析によりカトマンズ盆地内の観測点直下のS波速度構造を推定した。さらに、Bijukchhen et al. (2017)やMoribayashi and Maruo (1980)との比較を行い、推定したS波速度構造の妥当性を検証した。以下に知見をまとめる。

- 観測レーシーバー関数のPS-P時間は岩盤サイトで0.03秒、堆積層サイトで平均して約0.7秒であり、堆積層サイトでも最大で0.66秒の差があり、盆地内でも大きく異なる。
- PS-P時間は基盤深度と対応しており、約1.5kmの距離に位置するKTPとTVUはPS-P時間の差が0.75秒であり、大きな速度構造の変化が推察される。
- S波速度構造において本研究とBijukchhen et al. (2017)を比較すると、PTNとBKTでは地震基盤深度が50m程度異なる結果となった。
- 1次元地盤増幅率を計算した結果、BKTではBijukchhen et al. (2017)より観測との一致度が高く、モデルが改善された。
- Moribayashi and Maruo (1980)による重力探査結果との比較を行ったところ、基盤深度分布において調和的な傾向が得られた。

謝辞

本研究では、レーシーバー関数算出と遺伝的アルゴリ

ズムによる逆解析に広島大学の三浦弘之准教授によるプログラム、作図にGMT¹⁶⁾のフリーツールを使用した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1)Government of Nepal: Nepal disaster risk reduction portal. <http://drportal.gov.np/>, 2018年1月20日アクセス。
- 2)Takai et al.: Strong ground motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 68, No.10, 2016.
- 3)USGS (U.S. Geological Survey): <http://www.strongmotioncenter.org/>, 2017年7月19日アクセス。
- 4)Adhikari et al.: The aftershock sequence of the 2015 April 25 Gorkha Nepal earthquake, *Geophys. J. Int.*, Vol.203, pp.2119-2124, 2015.
- 5)Ichiyani et al.: Aftershock activity of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake determined using the Kathmandu strong motion seismographic array, *Earth Planets Space*, Vol.68, No.25, 2016.
- 6)Mahesh et al.: One-Dimensional Reference Velocity Model and Precise Locations of Earthquake Hypocenters in the Kumaon-Garhwal Himalaya, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.103, No.1, pp.328-339, 2013.
- 7)Langston: Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No.89, pp.4749-4762, 1979.
- 8)小林・他: 深い地盤構造評価のためのPS変換波の検出方法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第505号, pp.45-52, 1998.
- 9)三浦・他: 地震記録から抽出された地盤増幅特性とレーシーバー関数の同時逆解析によるS波速度構造モデルの推定, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第5号, pp.31-49, 2014.
- 10)Bijukchhen et al.: Estimation of 1-D velocity models beneath strong-motion observation sites in the Kathmandu Valley using strong-motion records from moderate-sized earthquakes, *Earth Planets Space*, Vol.69, No.97, 2017.
- 11)Haskell: Crustal Reflection of Plane P and SV Waves, *J. Geophysical Res.*, Vol.67, No.12, pp.4751-4767, 1962.
- 12)Ludwig et al.: Seismic Refraction: The Sea, *Wiley-Interscience*, Vol.4, pp.53-84, 1970.
- 13)山中・石田: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp.9-17, 1995.
- 14)Haskell: Crustal Reflection of SH Waves, *J. Geophysical Res.*, Vol.65, No.12, pp.4147-4150, 1960.
- 15)Moribayashi and Maruo: Basement Topography of the Kathmandu Valley, Nepal -An Application of Gravitational Method to the Survey of a Tectonic Basin in the Himalayas-, *J. Japan Soc. Eng. Geol.*, Vol.21, No.2, pp.30-37, 1980.
- 16)Wessel,P. and W.H.F.Smith: Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, Vol.94, pp.409-410, 2013.

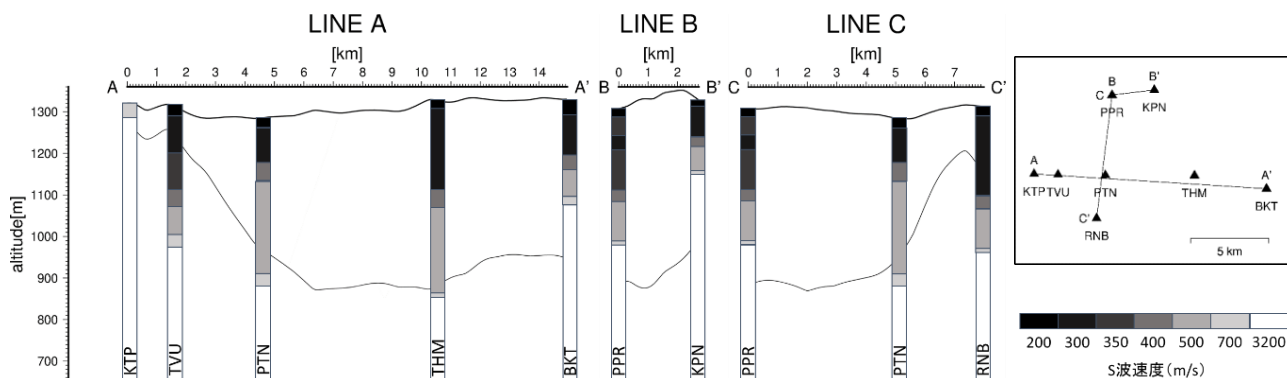


図8 本研究の推定S波速度構造とMoribayashi and Maruo (1980)の基盤深度との比較