

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04498

研究課題名(和文)ネパール地震の被害を左右したカトマンズ盆地の地盤構造と地盤物性に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Fundamental research on the ground structure and soil properties of Kathmandu Basin affecting damage during the 2015 Nepal Gorkha Earthquake

研究代表者

森 伸一郎 (Mori, SHINICHIRO)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：10304643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：2015年マグニチュード7.8のネパール・ゴルカ地震で首都のカトマンズ盆地では建物被害が地域で大きく異なり、地震動の観点からこの原因を究明した。単点地盤微動(300地点)で卓越周期マップを作成した。3つの被害集中地区で3種類の地盤探査を行い表層地盤構造を推定した。Khusibu地区では詳細な平面分布を得た。RC造建物集中被害地域では、表層にVs=100m/sの薄い超軟弱層(現地でBlack Cotton Soilと呼ばれる)の有無が建物被害を決定づけた要因の一つであることがわかった。表層の薄い軟弱層が被害を大きくするのは熊本地震での益城町の集中被害でも指摘されており、類似が興味深い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表層の超軟弱層の有無が建物の地震動による被害を大きくすることは、今後の日本の耐震性評価を考える上で、国民が建物や家屋を建てる際にも注意すべき事項であり、土地の評価にも関わる重要な関心事となる。

研究成果の概要(英文)： Building damage in the capital's Kathmandu basin after the 2015 M7.8 Gorkha earthquake in Nepal The cause of this difference was investigated in terms of seismic motions. Single-point ground microtremors (300 locations) were used to create predominant period maps for three different types of ground Surface geological structure was estimated by conducting a survey.

In the Khusibu area, detailed planar distribution was obtained, and in the area where RC buildings were intensively damaged, Vs= The presence or absence of a thin ultra-soft layer of 100m/s (locally called Black Cotton Soil) It was found to be one of the factors that determined the building damage. The thin soft layer on the surface of the building is the main cause of the damage in Mashiki town, which was damaged in the Kumamoto earthquake. The parallels are interesting.

研究分野：地震工学

キーワード：カトマンズ盆地 地盤探査 軟弱層 ネパール・ゴルカ地震 地震動増幅 被害集中域 建物被害 微動アレイ探査 表面

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2015年4月25日、ネパールの首都カトマンズ北西77km付近のゴルカ地方の深さ15kmを震源としてネパール・ゴルカ地震(マグニチュードMw7.8と推定)が発生し、特に、160万を超える家屋が全壊し、300万を超える世帯の家が被害を受けたとネパール政府より報告されていた。被害を被った建物は、地方では耐震性の極めて低い無補強組積造(URM)、カトマンズでは無補強レンガ壁の鉄筋コンクリート骨組造(RCIW)がその主な建築構造である。

カトマンズは表層を湖沼堆積物とするカトマンズ盆地内に位置しており、地震危険が指摘されていた。研究代表者は、2008年に微動観測を実施し、カトマンズ盆地の卓越周期は長いもので4秒にもなり、深い盆地構造を反映していることを初めて指摘していた(久木留,森,ネトラ,2009,下図)。今回の地震では、米国が高速GPS観測と地震観測により盆地内部で周期4秒の増幅があったことを立証した(Galetzka et al., Science, 2015)。

地震直後の現地調査によれば、当初予想された被害に比べると、カトマンズ盆地内の被害率は5%程度であり、倒壊は1%以下と低かった(Okamura, Netra, Mori, et al., Soils and Foundations, 2015)。ネパールの耐震設計は、建築基準で制定(NBC205,1994)されており、RCIW造の中高層建物の固有周期は1秒程度かそれ以下である。したがって、上記の長周期地震動では構造物の被害は説明しがたく、構造物の被害に影響の大きい、1秒程度かそれ以下の短周期地震動を決定づける表層の地震動増幅特性と地震被害との関係を明らかにすることが必要である。しかし、NBC205には構造物に作用する地震動外力を左右する地盤増幅係数は、カトマンズ盆地では未解明で未導入である。

また、カトマンズでは、ネパール国で行われていた地震観測は1地点のみであり、米国が1地点、日本が3地点を設置していただけて、地震後に公開されたのは米国の1地点のみである(USGS,2015)。この状況からは、地震観測記録の分析だけでは、カトマンズ盆地内の短周期地震動の増幅特性を明らかにして、その点から被害への影響を検討することができない。

カトマンズ盆地内の建物被害が全般に少ない一方、一部では集中的な被害が発生していることことから、この地震被害発生状況の原因を究明し、地盤増幅の特性を詳細に解明することが学術的にも望まれた。そのために、(1)盆地の詳細な地盤構造や振動特性の分布を解明すること、(2)ゴルカ地震時の盆地内各所での地震動を推定すること、(3)被害建物分布との対比から建物の被害関数を推定することが研究として必要であると思われる。我が国の地方都市や諸外国ではボーリングデータや地震観測などが極めて少なく、このような短周期地震動の増幅特性と構造物の地震被害の関係を明らかにすることは、共通の課題に対する解決となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、2015年4月25日、マグニチュード7.8のネパール・ゴルカ地震で大きな長周期地震動と小さな短周期地震動が観測されたカトマンズ盆地における建物被害が地域ごとに大きく異なる原因を究明することである。そのために、盆地内のいくつかの被害集中域に焦点を当てて、その域内と周辺地域との比較により、被害集中域の地盤振動特性と地盤構造を明らかにすること、また、盆地内広範囲の卓越周期マップを作成し、被害分布と照らし合わせることで、それら被害集中域の盆地内での一般性・特殊性を明らかにすることが目的であった。

### 3. 研究の方法

2017年度、盆地内広範囲の地盤微動(300地点)により、盆地内卓越周期マップを作成し、建物被害集中地域とそれ以外に分けた。被害集中区域(Khusibu:K、Gongabu:G、Sankhu:S)で追補的な微動観測、半径0.6mのアレイ微動探査、表面波探査を行い、地盤構造を推定した。単点の微動観測では、HVスペクトル比の形状で認められるピークとディップの組み合わせから卓越振動数を読み取ることで地盤の卓越振動数を求める方法を採用した。微動アレイ観測には、2017年の観測ではJU-210(白山工業社製)を用いた。2018年と2019年では、固有振動数4.5Hzの動コイル型の速度計(0.5~20Hzでほぼ平坦な利得特性)3成分のCR4.5-2S(物探サービス(現・ANET)製)を4台用い、データロガーとしてGEODAS-15-UDB-24ch(同社製)を用いた。

20m以浅ではアレイ微動探査、表面波探査の結果が良く一致した。また、表層の10m以浅の浅い部分にせん断波速度100~150m/sの軟らかい層がありそうだとわかった。一方で、特に30mないし40mの深さでは精度が不十分であった。半径0.6mのアレイでは不十分であることがわかった。

2018年度、より深い構造を把握することを目的にKとGの2地区で半径5mのアレイ微動探査を2か所ずつで実施した。狭い道路ばかりの街区であること、公共の広場・公園などのオープンスペースが極めて少ないこと、精度の高い地図が利用できないことなどから、半径5mの三角形アレイが最大である。

K地区については、集中したRC造建物被害は地盤の0.5~1.5秒の卓越周期の違いや表層20m以浅のVsが100m/sと小さい軟弱な層の有無で説明できる可能性がわかった。この地区では、1か月の微動観測を行い、得られたデータに対して地震波干渉法を適用した。同じ方法で事前に岩手において実施した結果は信頼できたが、K地区の結果は満足できるものではなかった。微動の

特性が日本（岩手）とネパールでは異なるものと考えられた。

2019年度は、2か年での成果を確定的なものとするために、集中的にKとGの2地区で半径5mのアレイ微動探査を追加実施した。

K地区の集中被害地域には $V_s=300\sim 400\text{m/s}$ の工学的基盤層が80m程度と深く周期0.8~1.5秒となること、特に表層に共通して $V_s=100\text{m/s}$ の薄い軟弱層があることがわかった。この軟弱層は、現地でBlack Cotton Soilと呼ばれるものに対応するものである。成果は現在、投稿中である。表層の薄い軟弱層のあるところで被害が大きくなるのは、熊本地震での益城町でも見られたことであり、類似が興味深い。

#### 4. 研究成果

カトマンズ盆地では建物被害が地域で大きく異なり、地震動の観点からこの原因を究明した。単点地盤微動（300地点）で卓越周期マップを作成した。図-1にカトマンズ盆地中心部の微動測定点と1次卓越周期の分布を示す。卓越周期が4秒以上の領域は連続性が乏しい。一方、2秒以下の領域が卓越している。3つの被害集中地区のうち、KhusibuとGongabuの2地区はこの図の領域にある。ここでは、紙面の制約から、Khusibuの成果を紹介する。

図-2にKhusibu地区における被害グレード別建物被害分布と微動観測、表面波探査、微動アレイ探査の各地点を示す。この地区での直後の緊急被害判定は、2015年5月5日、6月25日、EMS983)の判定基準（Grade 1~5を図に表記）に準じて研究代表者らが実施したもので、無被害をGrade 0として表記・整理した。被害グレードは次のように名付けられている。ただし、地図化と正確な位置については、今回の研究プロジェクトの最初の2か年で精査して作成した。

Grade 0: No damage (無被害)

Grade 1: Negligible to slight damage (軽微な被害)

Grade 2: Moderate damage (小破)

Grade 3: Substantial to heavy (中破)

Grade 4: Very heavy damage (大破)

Grade 5: Destruction (崩壊)

これらGradeの日本の災害救助法の被害認定区分との対応は、Grade1,2が一部損壊、Grade3が半壊、Grade4,5が全壊に対応する。図-3にKhusibuの中央部の被害集中部の状況を示す。倒壊している建物の周囲はRCIW構造のカトマンズで標準的な建物がG3やG4となる重度の被害を受けている。したがって、この地域では地震動が周辺よりも大きかった可能性がある。

単点・アレイ微動観測点においてH/Vスペクトル比法により地盤の卓越周期の分布を求めたが、水平動H、鉛直動VのそれぞれでSN比が2以上であることを条件とし、ピークとディップの組み合わせが視認できるもののピークを卓越振動数として読み取った。



図-3 Khusibu地区の中央部に位置する重篤な建物被害が集中した地域の状況。GはEMS98による被害グレード。

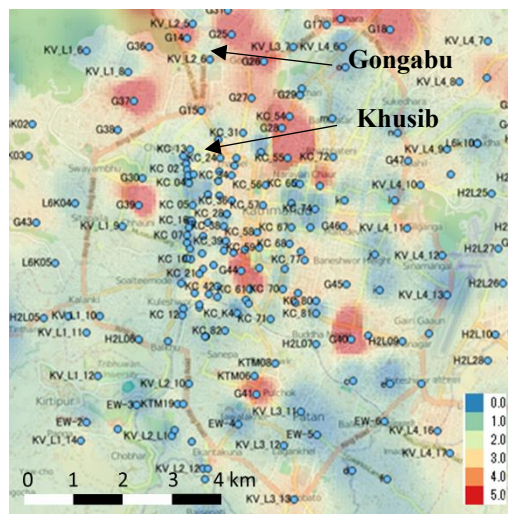
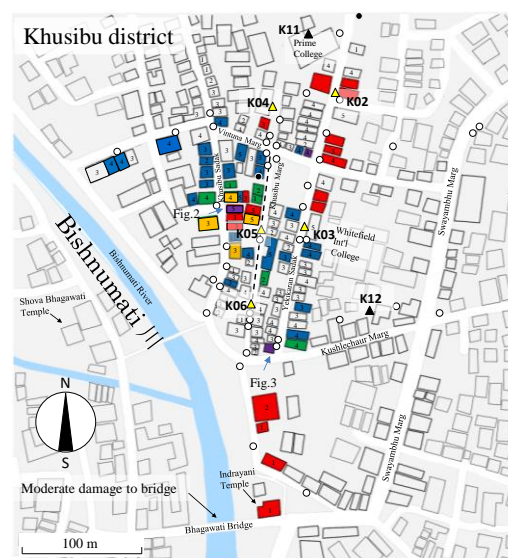


図-1 カトマンズ盆地中心部の微動測定点と1次卓越周期の分布



Legend: Damage grade as per EMS98 scale  
 □ Grade 0: No damage  
 □ Grade 1: Negligible to slight damage  
 □ Grade 2: Moderate damage  
 □ Grade 3: Substantial to heavy  
 □ Grade 4: Very heavy damage  
 □ Grade 5: Destruction  
 □ Numbers inside squares: Number of floors  
 ○ Microtremor measurement (single)  
 △ Microtremor array measurement ( $r=0.6\text{ m}$ )  
 ▲ Microtremor array measurement ( $r=5.0\text{ m}$ )  
 - - Surface wave exploration line  
 ● Seismograph for interferometry

図-2 Khusibu地区における被害グレード別建物被害分布と微動観測、表面波探査、微動アレイ探査の各地点

図-4 に H/V スペクトル比の地点別の変化を示す。この図では、地点5から地点9までのでは振幅が大きいという特徴がある。特にこの範囲で重篤な被害の位置が重なっている。H/V比の振幅と地震時の水平動の振幅が大きくなるとともに繋がる可能性がある。

図-5 に Khusibu 地区における南北測線の一次卓越周期分布を示す。Khusibu Marg 通りの南側延長線上の端部の微動測点を基準にして距離を測っており、南側3点目がこの通りの入り口である。南で短く0.7秒程度であるが、北へ行くほど長くなり、3階以上建物の被害集中域では1.2秒程度となっている。これより北では1.1~1.3秒が卓越する。このように狭い範囲で急激に卓越振動数が変化しており、Bishnumati 川の氾濫原と考えられるため地盤構造が比較的急激に変化していると考えられる。

図-6 に Khusibu 地区と周辺の地形図を示すが、Bishnumati 川が蛇行している内側に位置しており、この着目している地区では北に行くほど、河川氾濫堆積層は厚くなり、後背湿地の堆積土粒子はより細粒になることが考えられる。

そこで、表層地盤の構造を調べるために微小アレイ観測と表面波探査を行った。

図-7 に微小アレイ観測結果より分散曲線を求めて、逆解析によって予備的な分析で得られた速度構造 (K01~K06 地点) を示す。Vs を 100, 200, ..., 500 m/s として、分散曲線と H/V 比のピークを合わせるように層厚を求める逆解析である。最表層の 100 m/s の層厚に違いがある。Vs が 200 m/s の層の下端深度は H/V のピーク周波数に依存していると考えられた。

そこで、表層の詳細構造を把握するために表面波探査を、工学的基盤層の深さを把握するために半径 5m のアレイ探査を行った (図-8)。

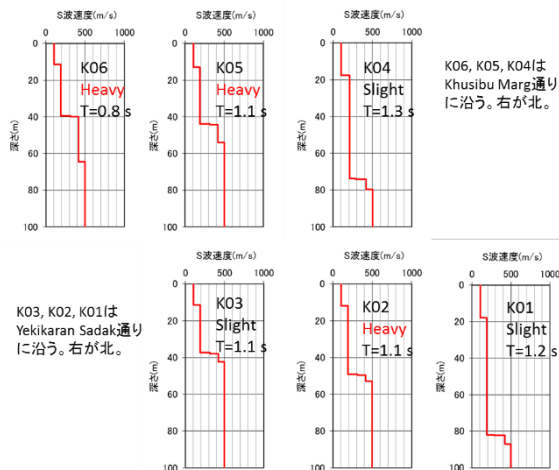


図-7 微小アレイ観測により得られた速度構造 (Khusibu、K01~K06 地点: K03 と K05、K02 と K04 は東西に離れて南北位置はほぼ同じ)



図-8 半径 5m アレイの例 (K11 : Prime College)

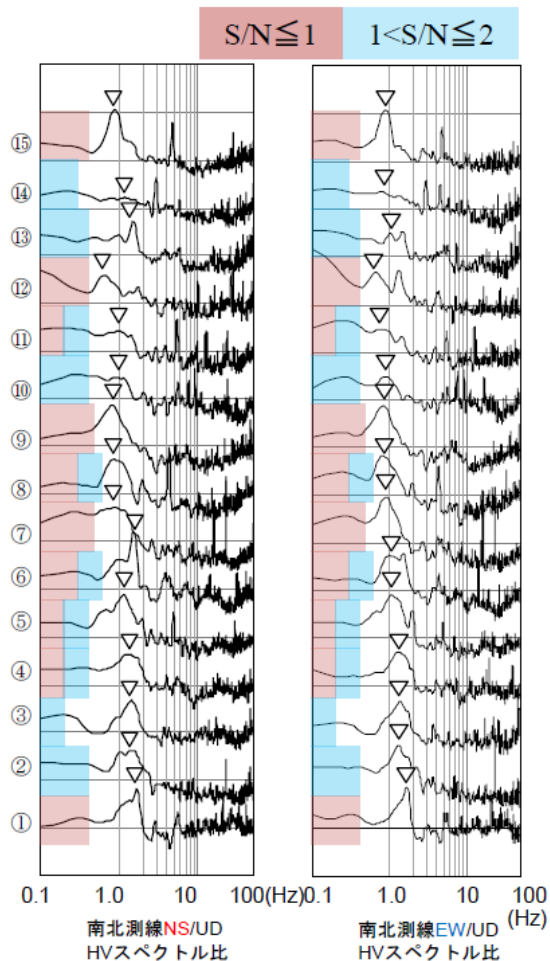


図-4 H/V スペクトル比の地点別の変化 (左は NS/UD 成分, 右は EW/UD 成分)

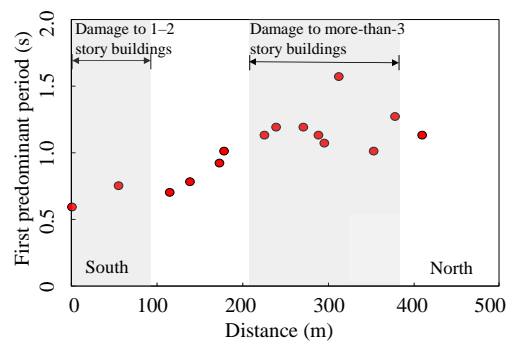


図-5 Khusibu 地区における南北測線の一次卓越周期分布

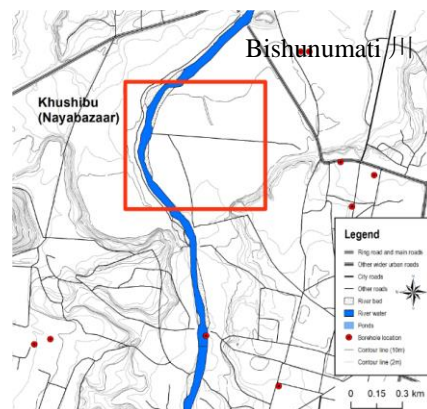


図-6 Khusibu 地区の地形図

図-9 に表面波探査結果による地盤速度の2次元構造(測線南部、K06~K05に相当)を示す。表層20m以浅でVsが200m/s以下となっており、被害の重篤であった南部では深さ3~7mにVsが150m/s前後の層がある。低振動数領域での分散曲線が得られず、反射面が20mよりも深い位置にあると考えられる。微動アレーデータの分析から、CCA法によるSN比は2~4Hzで良く、その分散状況から見て、最表層は80~100m/sと低い速度であると評価できる。表層に100m/s程度のVsの低速度層の存在が両方の調査からわかった。

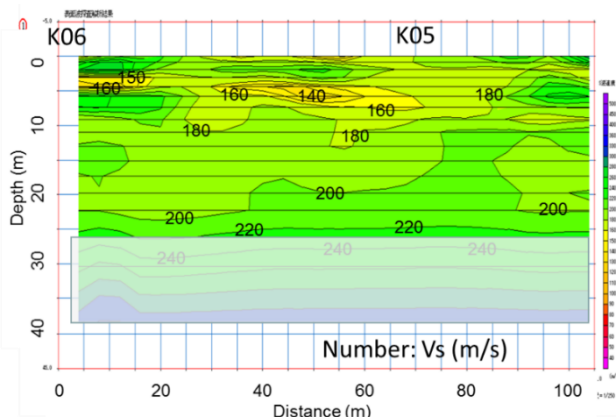


図-9 表面波探査結果による地盤速度の2次元構造(測線南部、K06-K05に相当)

そこで、2018年度、2019年度で実施したKhusibu地区の合計6箇所で行った半径5mアレー微動観測を合わせて再分析を行った。

分析に当たっては、解析にはBIDOとTremorDataViewを使用した。20.48sを一つのセグメントとして可能な限り多くのセグメントを解析対象とした。BIDOにより得られた分散曲線から信頼できる区間を決定し、値の抽出を行った。分散曲線はSPAC法のものを採用した。信頼区間は、原則NS比が0.1以下の区間とした。また、SPAC係数のばらつき具合なども考慮した。低振動数側は位相速度の連続性を考慮した時のピークまでを採用した。初期地盤構造(層厚、密度、 $V_p$ 、 $V_s$ )とレイリー波分散曲線、HV比を条件として与えた。層厚、密度、 $V_p$ は下記の値を用いた。 $V_s$ は3分の1波長則を適用した値を、0~3m、3~10m、10~30m、30~60mで平均した。HV比は低振動数側がSN比1以上、高振動数側を10Hzまで採用した。

工学的基盤はHV比のピークで決定づけられた。ピークは南から北に向かって長周期化しており、地点1,2,3では深さ30m付近でVsが約200m/sに増え、深さ60mでVsが320~370m/sに増えており、工学的基盤が60m付近の深さにあるのに対して、地点4,5では、深さ35m付近でVsが約230m/sに増え、深さ75mでVsが360~370m/sに増えており、工学的基盤が75m付近の深さにある。一方、地点1,2,3では深さ30m以浅がVs=120-130m/sであるのに対して、地点4,5では、35m以浅がVs=150-160m/sである。Vs=120-130m/sとVs=150-160m/sは数字としては近いが、軟弱地盤か否かを考えた場合、前者は軟弱度が大きい。深さ10mまでの浅層では、Vs=100m/s程度である。

被害は地点2,3に集中しており、深さ30m以浅がVs=120-130m/sであること、すなわち、軟弱な土層が厚く堆積しているところに被害が集中していたということができそうである。



- 地点番号：調査地点名  
 1：Near by Whitefield Int'l College  
 2：Khusibu Collapose site  
 3：Shubha Laxmi  
 4：Prime College Bachelors Building  
 5：Khusibu Park  
 6：GTJ school

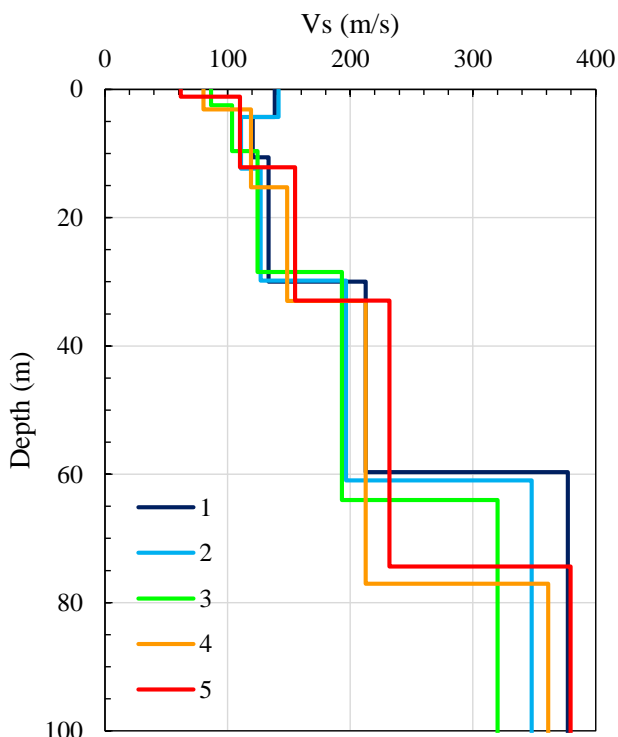


図-10 Khusibu地区の半径5mアレー観測地点6地点の位置と推定された地盤のVs構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山本 英和, 佐々木 恭輔, 齊藤 剛	4. 巻 72
2. 論文標題 浅部2次元S波速度構造推定を目的とした短周期微動の地震波干渉法解析 - 岩手大学構内における試み -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 物理探査	6. 最初と最後の頁 17-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 起田賢親、山本英和、齊藤剛	4. 巻 55
2. 論文標題 福島県の広帯域リニアレイで観測された常時微動の地震波干渉法解析—南北測線における解析—	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 179-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木恵太、山本英和、齊藤剛	4. 巻 55
2. 論文標題 岩手大学で観測された短周期微動の地震波干渉法解析による群速度の推定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北地域災害科学研究	6. 最初と最後の頁 185-190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森 伸一郎, ラトナP.トヤナ, 全 邦釘
2. 発表標題 ネパールのカトマンズ盆地における地盤振動特性
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 伸一郎, 小林 巧, 馮 金戈, ネットラ P. バンダリ, 山田 雅行, 山本 英和
2. 発表標題 2015年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ市内被害集中域の振動特性と地盤構造
3. 学会等名 第37回日本自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馮 金戈, 森 伸一郎, 小林 巧
2. 発表標題 ネパール・ゴルカ地震でのカトマンズ市集中被害地域の振動特性
3. 学会等名 平成30年度地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 伸一郎, 馮 金戈, 小林 巧, 山田 雅行, 山本 英和, バンダリ ネットラP.
2. 発表標題 2015 年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ盆地内のある被害集中域の表層地盤の物理探査
3. 学会等名 物理探査学会第140回(2019年度春季)学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 伸一郎, 馮 金戈, 小林 巧, 山田 雅行, 山本 英和, ネットラP. バンダリ
2. 発表標題 2015 年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ盆地内のある地域での被害集中の原因
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 伸一郎, ラトナP.トヤナ, 全 邦釘
2. 発表標題 ネパールのカトマンズ盆地における地盤振動特性
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 英和  (Yamamoto Hidekazu)  (00250639)	岩手大学・理工学部・准教授   (11201)	
研究分担者	N . P   B h a n d a r y  (Bhandary N.P.)  (10363251)	愛媛大学・社会共創学部・教授   (16301)	