

平成 30 年 8 月 24 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01250

研究課題名(和文) 1943年鳥取地震鹿野断層端部における断層変位と強震動が被害に及ぼした影響の分析

研究課題名(英文) Evaluation of the effects of fault displacement and strong ground motion on the damage of the 1943 Tottori earthquake at an edge of Shikano fault

研究代表者

香川 敬生 (Kagawa, Takao)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：50450911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：横ずれ地表地震断層近傍の断層変位及び強震動による被害の典型例として、1943年鳥取地震時の鹿野町域を対象とした検討を行った。当時の調査写真から被害の様相を分析し、詳細震度分布と地殻変動を満足するよう断層破壊モデルを想定した。主に常時微動観測を用いて地盤増幅の影響を評価し、2016年熊本地震の調査結果も踏まえて永久変位を含む代表地点の地震動を予測した。現地古民家の固有周期、減衰を調査して作成した家屋振動モデルで地震応答解析を実施し、倒壊を免れた家屋は予測地震動で倒壊しないものの、被害が集中した地域の地震動では倒壊に至るとの結果を得た。加えて、断層近傍の地盤応答に関する興味深い知見も得られた。

研究成果の概要(英文)：Fault displacement and strong ground motion in Shikano town, Tottori city under the 1943 Tottori earthquake are examined as typical damage of strike slip earthquake. Disaster situation in the town is reconstructed from several photos by the survey team at that moment. Seismic intensity distribution were also investigated from questionnaire survey. Fault slip model of the earthquake is developed using the information above considering survey results of the 2016 Kumamoto earthquake. Strong ground motions including permanent displacements are simulated adding effects of surface geology estimated in the target area. Seismic response of old wooden house which survived from the 1943 Tottori earthquake, is evaluated. The house also survived from simulated wave at the location, but collapsed by an estimated wave at heavily damaged area. It is also found that typical predominant periods are not clearly distinguished in the vicinity of surface faults. It can be a further research subject.

研究分野：強震動地震学，応用地球物理学

キーワード：地表地震断層 断層変位 強震動 横ずれ断層 1943年鳥取地震 鹿野断層

1. 研究開始当初の背景

(1) 1943年鳥取地震の概要

本研究で対象とする1943年鳥取地震は1995年兵庫県南部地震と同様の横ずれ断層地震であり、断層中央から両端に向けて破壊が進行し、西の鹿野町方面には地表地震断層が生じたが、東の鳥取市街方面には生じず、生じなかった鳥取市街に大被害が特に集中した。

(2) 地表地震断層地震と潜在断層地震

Somerville(2003)は、地表断層を生じた地震(地表断層地震)に比べて生じなかった方(潜在断層地震)が、建物被害に影響する周期1秒程度の地震動が大きくなることを示し、Kagawa et al.(2004)は、この原因を断層すべり速度および応力の違いとしている。兵庫県南部地震はこの考えで説明できるが、鳥取地震の詳細は不明である。

(3) 鳥取地震の震源断層に関する既往研究

1943年鳥取地震は近代地震観測網が構築される以前に発生した地震ではあるが、地震前後の測量による地殻変動と、数は少ないものの国内観測記録が遺されており、これらを満足する震源断層モデルが提案されている(例えば、Kanamori, 1972, 中田・他, 2006)。他の歴史地震について推定震度分布を用いた震源のモデル化も行われているが、断層破壊進展を考慮したモデルには至っていない。

2. 研究の目的

(1) 鳥取地震による鹿野町の地震動解明

鳥取市鹿野町は、鳥取地震で生じた吉岡・鹿野断層の端部域にあたり、断層変位による被害と強震動による被害がともに生じている。これらを詳細に見ると、断層変位による被災家屋には強震動の影響が小さく、むしろ地表地震断層から離れた地域で強震動による被害が大きい。鳥取地震の震源断層破壊をモデル化し、鹿野町域の地盤震動特性を把握することで、この様な現象の解明をおこなう。

(2) 横ずれ断層による典型的な現象の解明

本研究期間において、2016年4月14、16日に地表地震断層を生じた熊本地震が発生し、鳥取地震と同様に、断層変位による被災では強震動の影響が小さく、地表地震断層から離れた地域に強震被害が集中していた。また、2016年10月21日には地表地震断層を伴わない鳥取県中部の地震が発生し、強震動による被害を生じた。これら近代観測記録が得られている地震において、震源断層近傍で見られた現象を新たな成果として取り入れる。

3. 研究の方法

(1) 鳥取地震による鹿野町の地震動解明

1943年鳥取地震では、現在の計測震度計の分布に匹敵する西南日本約1950ヶ所のアンケート震度分布(西田・他, 2013)が得られている。これを現行の計測震度に変換し、地震

前後の地殻変動の両方を満足する震源破壊過程の推定をおこなう。さらに現地調査により地盤震動特性の把握を詳細に行うことで被災域における強震動および断層変位を推定する。さらに、現地に残る鳥取地震当時の家屋の振動特性を把握し、予測地震動による建物倒壊シミュレーションを実施する。これらを通して、予測地震動の整合性を考察する。

(2) 横ずれ断層による典型的な現象の解明

2016年4月14、16日熊本地震、2016年10月21日鳥取県中部の地震の観測記録の分析、現地調査を実施し、地表地震断層ごく近傍で生じた現象について考察することで、横ずれ断層地震に典型的な現象の整理をおこなう。

4. 研究成果

(1) 鳥取地震による鳥取市鹿野町の被害

1943年鳥取地震直後に、東京大学地震研究所が現地調査に入った際の未公開写真221枚が発見された。写真から推し量られる調査行程は、鳥取市街から断層が現れた鹿野町への調査途上で撮られたものと思われ、東京帝国大学地震研究所彙報第22号第1冊(昭和19年3月)に掲載された論文に関連して撮影された一部と考えられる。そこで、写真に遺された情報を解読し、現地踏査を組み合わせることで、当時の調査ルート解明を試みた。また、一連の写真からは鹿野町内の被災状況を追跡することができ、やや標高の低い大工町(図1)の中川周辺(写真に橋が見える)で倒壊家屋が多く生じていることが分かった。これらに加えて、当時を経験された方々にインタビューをおこない、町内の被災状況の把握に努めた、その内容はDVDに整理した。



図1 鹿野町内大工町の当時(左)と現在(右)

(2) 鳥取地震の震源破壊モデル

鳥取地震の震源断層モデルについては、Kanamori(1972)が地震前後の地殻変動と京都大学阿武山地震観測所で得られた波形を満足するように、走向N80E、長さ33km、幅13km、2.5mの一樣すべりを持つ鉛直右横ずれ断層を想定している。ただし、地殻変動は断層からの距離に対するすべりの大きさのみを評価し、すべり方向は考慮されていない。中田・他(2004)は、松江など国内5点の地震観測記録を満足するよう、非一樣破壊モデルを提案した。断層長さはKanamori(1972)とほぼ同様であるが幅は倍程度大きく、すべりの最大値は5mとなっている。東京大学が地震直後に実施した鳥取地震の震度アンケート調査の集計資料が遺されて

おり（津村・他，2010），西田・他（2013）が整理して改正メルカリ震度階分布図が作成されている。これを現行気象庁震度階に改め（香川・他，2015），被害調査から推定される震度7相当のデータを加えて，鳥取地震断層周辺の震度分布として整理した。

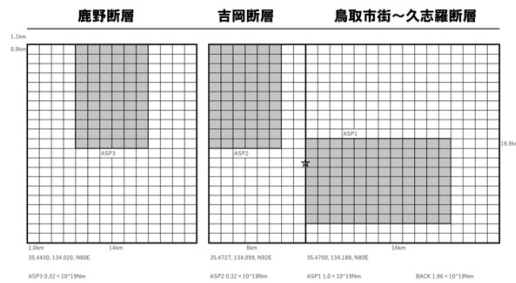


図2 1943年鳥取地震の特性化震源モデル

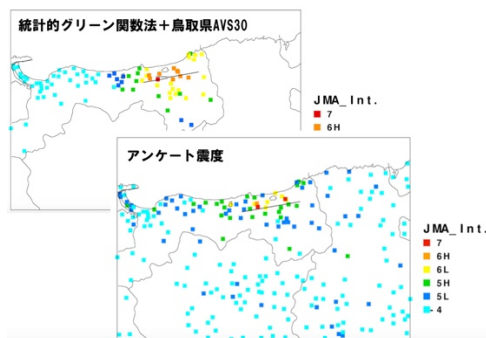


図3 想定震源モデルによる震度分布の再現
(上：観測，下：再現)



図4 想定震源モデルによる地殻変動の再現

中田・他（2004）の非一様破壊モデルを参照としつつ鳥取県地震被害想定（2007）によるAVS30分布に基づく地盤増幅（松岡・翠川，1994）を考慮し，統計的グリーン関数法（香川，2004）から得られる震度分布，およびOkada（1985）によって評価した地殻変動ベクトルを満足するような震源破壊過程の推定をTrial and Errorでおこなった。地殻変動の方位を忠実に再現するためには，Kanamori（1972）や中田・他（2004）が採用した1枚断層モデルでは不十分であり，地表地震断層（吉岡・鹿野断層）をトレースする3枚断層とした。得られた特性化震源モデルを図2に，計測震度および地殻変動の再現状況を図3，4に示す。なお，図2ハッチ部のアスペリティ（強震動生成域）の応力降下量とすべり継続時間は，深いものが15MPaと0.9秒，浅いものが10MPaと1.5秒となった。

(3) 鳥取市鹿野町の地盤震動特性

鳥取市鹿野町および周辺域において，常時微動の単点3成分観測記録を用いた地盤震動特性（H/Vスペクトル比による卓越周期）およびアレイ観測による地下構造モデルの推定をおこなった。地下構造モデルについては，ボーリングによるデータが存在する地点でのキャリブレーションをおこなっている。

図5に鹿野町市街域の微動卓越周期分布と，この範囲内で実施した微動アレイの位置を示す。一般的な木造家屋の固有周期である0.3-0.5秒程度が広く分布しており，地震動による建物の共振が被害をもたらした可能性が示唆される。また，東西に伸びる大工町では密な観測を実施しており，卓越周期の空間変動が大きく，図1に示した中川付近で卓越周期が1秒に近く，長くなっている。なお，観測には，本研究による補助で入手した，白山工業製のJU410を主に用いた。

図6には，代表地点で実施した微動アレイ観測から得られたS波速度構造モデルを示す。S波速度500m/s以下の堆積層が30mほどの厚みを持っていることが分かる。

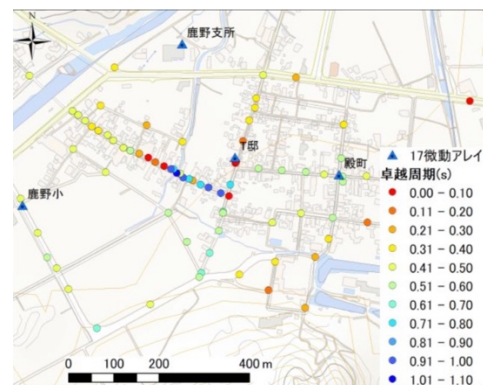


図5 鹿野町市街域の常時微動卓越周期分布

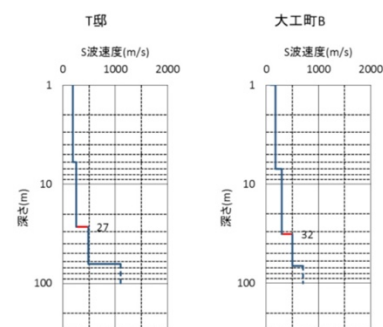


図6 鹿野町内代表地点の推定地盤構造

これらに加えて，地表地震断層を生じた法楽寺地区で実施した高密度3成分微動観測から得られたH/Vスペクトル比の分布を図7に示す。地表地震断層出現地点に直交して10m毎に計測した結果である。青四角で囲んだ帯域にピークがあり，断層を挟んで周期の変化が見られるため，表層の層厚が変化していることが示唆される。加えて，矢印で示した地表地震断層出現地点でそのピークが見られなくなっていることが特徴的である。このような

現象は、後述するように 2016 年熊本地震の地表地震断層ごく近傍でも見られた。地表地震断層付近における興味深い現象である。

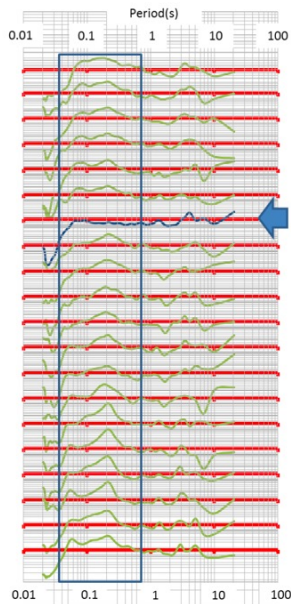


図 7 鹿野町法楽寺の地表地震断層出現地点の H/V

(4) 鳥取市鹿野町での地震動評価

次に、(2)で得られた特性化震源モデルおよび(3)で評価した地下構造を用いて、鳥取地震による鹿野町域代表地点の地震動評価を実施した。なお、深部地盤構造は鳥取県地震被害想定(2007)によるモデルを参考とした。まず、永久変位を含む長周期地震動の影響を見るため、有限差分法による地震動評価をおこなった。図 8 に断層周辺の地動速度粒子軌跡を示す。断層端の東西延長部では断層直交地震動が卓越しているが、断層に沿っては断層平行方向が卓越していることが分かる。なお、図中に赤枠で示した鹿野町域については、永久変位を合理的に説明するため、200m 格子を用いた詳細計算を実施している。

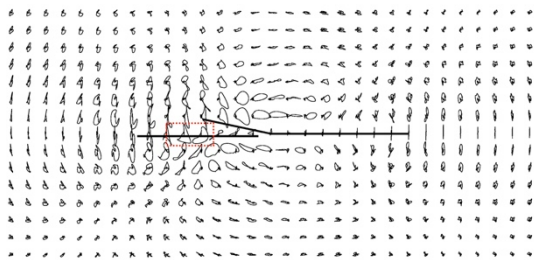


図 8 有限差分法による速度粒子軌跡 (枠内が鹿野町域)

短周期帯域については統計的グリーン関数法を用い、各地点の地下構造モデルに表層部の非線形地盤応答を等価線形法で考慮した上で地表面地震動とした。有限差分法による上述の長周期については、非線形地盤応答を含む表層地盤の影響は小さいと仮定して、これら両者をハイブリッド合成して図 9 に示す 3 地点で地震動を評価した。

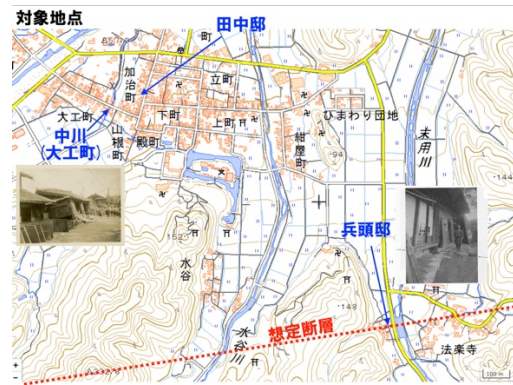


図 9 地震動評価地点

図 10 に地表地震断層による変位で被災した法楽寺の H 邸における想定変位波形を示す。東西成分の永久変位が一番大きく、これを 2 倍したものが断層変位となるが、観測事実と概ね対応している。

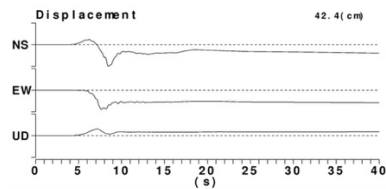


図 10 H 邸 (変位で被災) での変位波形

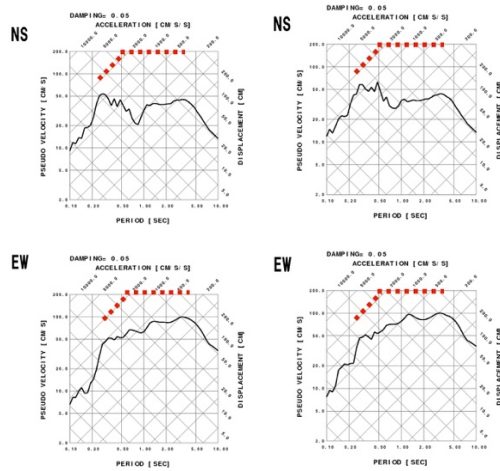


図 11 T 邸 (左: 倒壊せず) と大工町中川 (右: 被害大) での応答スペクトル

図 11 には、T 邸 (図 9) と被害が大きかった大工町中川周辺での応答スペクトル (三軸) を示す。1995 年兵庫県南部地震や 2016 年熊本地震による大被害域で得られた地震動のレベルを破線で示しているが、それらに比べれば小さめの地震動となっている。

(5) 予測地震動による建物の応答

次に、(4)で予測した地震動が建物に及ぼす影響を見るため、当時の建物の振動特性のモデル化をおこなった。鹿野市域には鳥取地震に耐えた家屋が遺っており、建物内各所に地震計を設置し、常時微動および人力加振によるデータを記録した。また、建物を詳細に計

測した結果を分析し、けた行方向および張り間方向の固有振動数、減衰、ベースシヤ係数を設定し、2質点系の弾塑性応答を評価した。図12に、T邸モデルに想定地震動を入力した際の、履歴曲線を示す。2階けた行方向の応答が小さいことを除けば、いずれの応答も大きく、1階の層間変形角は張り間方向で1/35、けた行方向で1/19となった。

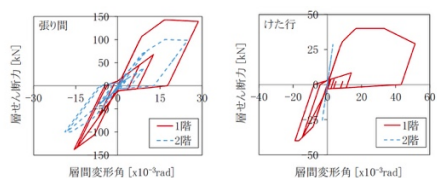


図12 想定地震動によるT邸の履歴曲線

大工町中川付近の地震動による影響を見るため、図12とは地震動の入力方向を入れ替えた計算を実施してみた、これは、T邸前と大工町の道路方向がほぼ90度異なるため、両地点の建物のけた行方向と張り間方向が入れ替わっていることを模擬した設定となっている。図11でT邸地点と大工町中川付近の地震動に大きな差が無いため、想定地震動はT邸のものを流用した。このとき、1階けた行方向で倒壊に至る結果となった。このことから、想定地震動が被害状況の違いを概ね表現していることが示唆される。加えて、T邸をDEM(個別要素法)によって3次元的にモデル化し、想定地震動による動的応答解析を実施した。図13にそのモデルを示す。この場合も、想定地震動では建物に大きな影響は生じなかった。

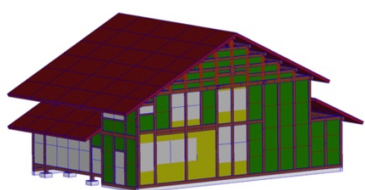


図13 DEMによるT邸のモデル化

(6) 熊本地震と鳥取県中部の地震
本研究期間中に、地表地震断層を伴う2016年熊本地震が発生した。現代の観測機器が捉え、詳細な調査の目が入った地震として、1943年鳥取地震の現地調査のつもりで震災約2週間後から現地調査を開始した。益城町郊外では地表地震断層の変位による被害は見られたが、強震動の影響はほとんど受けていないように思われた。そのため、地表地震断層ごく近傍と断層から離れた大被害域において、同時余震観測、および微動探査(単点3成分、アレイ)を実施した。微動観測からは、断層から離れて強震動による被害の大きい地域(益城町上陳の木山川沿い)のH/Vスペクトル比には図14上のように一般的な木造家屋の固有周期に近い明瞭なピークが見られた。一方で、地表地震断層

近傍で変位による被害がある一方で震動被害は軽微と考えられる地点(益城町下陳)では、図14下のように明瞭なピークが見られない。(3)で示した鳥取地震による鹿野断層ごく近傍と共通した結果が得られており、今後の展望が来される。

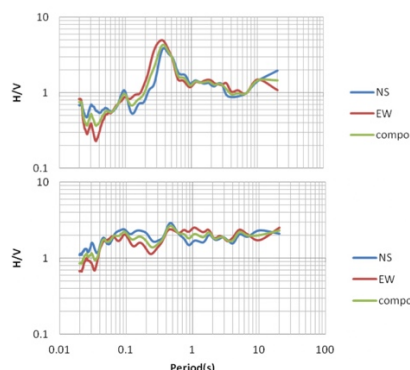


図14 断層から離れた震動被害域(上, 益城町上陳)と地表地震断層ごく近傍(下, 下陳)における微動H/V

2016年10月21日には鳥取県中部において被害地震が発生した。この地震についても、地表地震断層を伴わない横ずれ断層の事例として、現地調査(被害調査、余震観測、微動探査)および観測記録の分析を実施した。Somerville(2003)と同様に、スペクトル距離減衰式からの偏差を評価すると、地表断層地震にあたる熊本地震は平均より小さく、潜在断層地震に分類される鳥取県中部の地震は有意に大きいことが示された。

2016年鳥取県中部の地震のような潜在断層地震では大きな断層すべりは深部にあり、応力が大きくすべり速度関数が短周期のパルスを持ち、破壊進行方向にはディレクティブティ・パルスをで地震動が大きくなる。地表断層地震ではこの状況に浅い大すべりが加わり、それが地表地震断層を生じる。浅いすべり域は応力が小さく、すべり時間関数の継続時間も長いため長周期の地震動となり、強震動には寄与しない。ただし、浅い大すべりによって地震モーメントが大きく見積られるため、地震規模に比べて地震動は小さいと評価される。これが、Somerville(2003)および日本の内陸地震に見られた地表断層地震と潜在断層地震の地震動の成因と考えられる。また、断層破壊が水平方向に進行することにより、大すべり域による強震動(ディレクティブティ・パルス)はその直上ではなく遠方に大きな影響を及ぼす。横ずれ断層破壊では真上方向がS波放射のノードとなるため、直下の断層すべりによる地震動は小さい。このことも、地表地震断層を生じたごく近傍で地震動による被害が軽微であることと関連していると考えられる。

(7) 今後の展望

1943年鳥取地震については、特性化震源モデルの設定において、国内遠地や世界規模の観

測記録などを総動員した、より精緻なモデルを指向することが望まれる。想定地震動、建物応答解析についても同様であり、現時点の成果をより精緻化する検討を継続したい。横ずれ断層における震源近傍域の地震動については、断層すべり、特に地表地震断層を生じる浅部のすべりを動力学的に表現した定量的な検討が不可欠となろう。

地表地震断層ごく近傍において、堆積層は存在するものの明瞭な地盤増幅のピークが見られない現象は、地表地震断層部の地下構造また地震応答を考える上で大変興味深く、この現象の詳細検討による成果が期待される。

<引用文献>

- ① Kagawa et al., EPS, 56, 2004, 3-14.
- ② 香川, 日本地震工学会論文集, 4, 21-32, 2004,
- ③ 香川・他, 歴史地震, 30, 2015, 227.
- ④ Kanamori, PEPI, Vol. 5, 1972, 426-434.
- ⑤ 松岡・翠川, 第22回地盤震動シンポジウム資料集, 1994, 23-34.
- ⑥ 中田・他, 活断層研究, 24, 2004, 39-48.
- ⑦ 西田・他, 日本地震学会秋季大会, 2013, P2-43.
- ⑧ Okada, BSSA, 75, 1985, 1135-1154.
- ⑨ Somerville, PEPI, 137, 2003, 201-212.
- ⑩ 津村・他, 歴史地震, 25, 2010, 106-107.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 香川敬生, 吉田昌平, 野口竜也, 破壊伝播の違いによる横ずれ断層近傍の地震動, 土木学会論文集 A1, 査読有, 74, 2018.
- ② Kagawa, T., Noguchi, T., Yoshida, S., and Yamamoto, S., Effect of the surface geology on strong ground motions due to the 2016 central Tottori earthquake, Japan, EPS, 査読有, 69:106, 2017, 1-8. DOI:10.1186/s40623-017-0689-0
- ③ 野口竜也, 上野太士, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生, 鳥取県鹿野地域の地盤構造および地盤震動特性, 土木学会論文集 A1, 査読有, 73, 2017, I_894-I_906.
- ④ 香川敬生, 吉田昌平, 上野太士, 2016 年熊本地震で生じた地表地震断層ごく近傍の強震動について, 土木学会論文集 A1, 査読有, 73, 2017, I_840-I_846.
- ⑤ 吉田昌平, 香川敬生, 野口竜也, 日本内陸における地表及び潜在断層地震の地震動特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1, 査読有, 73, 2017, I_366-I_375.

[学会発表] (計 15 件)

- ① 野口竜也, 上野太士, 香川敬生, 吉田昌平, 向坊恭介, 浅井秀子, 鳥取市鹿野町における地盤震動特性と 1943 年鳥取地震時の建物被害に関する検討, 土木学会全国大会, 第 73 回年次学術講演会, 2018.
- ② 向坊恭介, 香川敬生, 野口竜也, 1943 年

鳥取地震を経験した木造民家の耐震性能評価, 日本建築学会大会(東北), 2018.

- ③ 野口竜也, 上野太士, 香川敬生, 吉田昌平, 西田良平, 1943 年鳥取地震の鹿野断層における微動および地中レーダー探査による断層調査, 断層帯近傍における地震動評価に関するシンポジウム, 2017.
- ④ 野口竜也, 上野太士, 香川敬生, 吉田昌平, 西田良平, 稠密微動観測による鹿野断層および鹿野町市街地の地盤構造推定, 日本地震学会 2015 年秋季大会, 2015.
- ⑤ 香川敬生・畑岡寛, 1943 年鳥取地震直後に実施された東京大学地震研究所の現地調査の足取り, 歴史地震研究会, 32, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他] 特に無し。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香川 敬生 (KAGAWA, Takao)
鳥取大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50450911

(2) 研究分担者

古川 愛子 (FURUKAWA, Aiko)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00380585

浅井 秀子 (ASAI, Hideko)
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10331810

野口 竜也 (NOGUCHI, Tatsuya)
鳥取大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20379655

西田 良平 (NISHIDA, Ryohei)
鳥取大学・名誉教授
研究者番号: 90027269

向坊 恭介 (MUKAIBO, Kyosuke)
鳥取大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 80512748

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

窪田 彰夫 (KUBOTA, Akio)
中電技術コンサルタント(株)・建築部・

横山 展宏 (YOKOYAMA, Nobuhiro)
鳥取市歴史博物館・学芸員