

平成 29 年 4 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249067

研究課題名(和文) 南海トラフの巨大地震・津波に対する社会基盤施設の安全性評価と効果的な対策法の構築

研究課題名(英文) Safety Evaluation and Effective Countermeasure for Infrastructures against Gigantic Nankai-trough Earthquake and Tsunami

研究代表者

清野 純史 (Kiyono, Junji)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：00161597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,300,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフの巨大地震の特徴は、地震動が長周期・長継続時間であること、強い揺れの後に時を待たずして大津波が来襲すること、そしてその被害が複数の府県を跨ぐ広域災害になり得ることである。

本研究では、社会基盤施設がこのような巨大地震・津波に対して、(1)ネットワークとしてどこまでその安全性を担保できるのか、(2)社会的要請としてどこまで構造的、機能的役割を果たすべきか、そして(3)そのための具体策をどのようにとればよいか、を明らかにするために、社会基盤施設の評価に適した入力地震動の設定、社会基盤施設の耐震・耐津波性能の評価、そしてネットワークとしての性能を考慮した効果的な対策の策定を行った。

研究成果の概要(英文)：Characteristics of Nankai Trough Earthquake are a long predominant period, a long duration, attack of tsunami after the strong shaking and a extensive damage area. In this study, we make clear an aseismic safety level of infrastructure, structural and functional capacity of infrastructures for the social requirement and the countermeasures for preventing earthquake damage. We assessed an adequate input ground motion for the design of structures, and evaluated the earthquake and tsunami prevention strategies and countermeasures especially for lifeline systems such as railway, roadway, water, gas, electricity and various pipelines. In order to realize these issues and extend the applicability, we conducted numerical simulations by using such advanced simulation methods as FEM, DEM and SPH. Centrifuge experiments were also conducted to verify such computer simulation. The results obtained would be useful resources for soft and hard measures of mitigating earthquake and tsunami disasters.

研究分野：地震工学

キーワード：南海トラフの巨大地震 社会基盤施設 地震時安全性 ライフライン 入力地震動 耐震耐津波性能評価  
ネットワーク性能 構造的機能的役割

### 1. 研究開始当初の背景

公共性の高い社会基盤施設に対しては、地震あるいは津波に対する高度な強靭さ・頑強さが要求されることは必然である。2011年東日本大震災の経験からもわかるように、南海トラフの巨大地震は、長周期の揺れを長時間の震動が継続すること、その揺れの大きさのみならず大津波を伴うこと、それが広域な災害をもたらすことが特徴である。このような地震・津波災害は、国外では1960年のチリ地震や2004年のスマトラ沖地震がその代表格である。しかし周期・継続時間等の地震動特性や社会基盤システムとしての脆弱性、超広域災害としての対応などが、事前・事後に考慮された訳ではない。

本研究では、来るべき南海トラフの巨大地震・津波に対して、現状の社会基盤施設が有する性能を明らかにし、要求性能を満足する対策法を提示することを目的としている。海溝型である南海トラフの大地震は、強震動発生域が陸域に位置する直下型地震となる可能性もあり、東日本大震災の延長線上としての考え方は成り立たない。そのため、過去の事例の徹底した調査・分析・解析のみならず、起こりうる可能性のある事象を網羅的に検討していくことが極めて重要である。

### 2. 研究の目的

南海トラフの巨大地震の特徴は、地震動が長周期・長継続時間であること、強い揺れの後に時を待たずして大津波が来襲すること、そしてその被害が複数の府県を跨る広域災害になり得ることである。

本研究の目的は、来るべき南海トラフの巨大地震・津波に対して、現状の社会基盤施設が有する耐震・耐津波性能を明らかにし、要求性能を満足する対策法を提示することである。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下の3つの研究体制を敷き、研究を遂行した。

- 1) 社会基盤施設の評価に適した入力地震動の合理的な設定
- 2) 社会基盤施設の耐震・耐津波性能の評価
- 3) ネットワークとしての性能を考慮した効果的な対策の策定

この体制下において、それぞれの視点から、(1)被災事例を収集・分析、系統整理し、評価・対策項目を確認、(2)個々の社会基盤施設の地震・津波応答解析および実験を実施し、具体的性能を明示、(3)相互関連システムとしての性能評価と課題抽出を行い、解決策を提示、の3項目を実行した。

### 4. 研究成果

#### (1) 南海トラフの巨大地震の概要

南海トラフ巨大地震では継続時間が長く、かつ揺れの大きな地震動と大津波が予想され、あらゆる土木構造物へ甚大な被害を及ぼ

す事が懸念される。土構造物を主とする様々な土木構造物が、南海トラフ巨大地震時に想定される地震動や津波によってどのような挙動を示すのかを提示した。

南海トラフは、西南日本沖の四国南岸から駿河湾沖に至る長軸の長さが約700kmの細長い海盆であり、西南日本弧が位置する大陸プレートに海洋プレートであるフィリピン海プレートが沈み込んでおり、その境界面がすべることにより、これまでに繰り返し大地震が発生してきた。近年では1944年に昭和東南海地震、1946年に昭和南海地震が発生し、地震動や津波により甚大な被害が生じた。これらの地震発生から既に70年近くが経過し、南海トラフにおける次の大地震発生の可能性が高まっている。

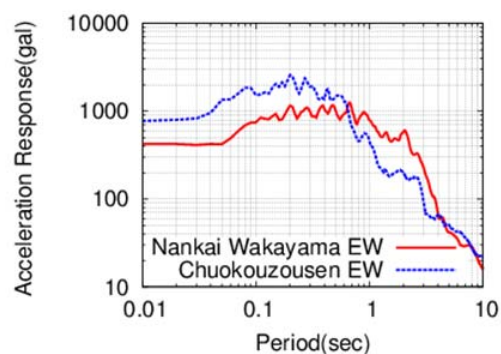


図1 海溝型と直下型の応答スペクトルの比較

海溝型の地震動である南海トラフ巨大地震の和歌山市(県庁)での加速度応答スペクトルと中央構造線のスペクトルを図1に示す。海溝型の南海トラフは周期1秒付近から数秒までの長周期成分が相対的に卓越していることが分かる。

このような南海トラフの巨大地震の入力特性に対応して、構造物はどのような応答を示すのか、またその耐震安全性はどのように考えられているのか、その補強法はどのようなものが考えられるのかについて検討を行った。

#### (2) 社会基盤施設の安全性評価のための強震動予測

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)は、今日のような密な強震観測網が構築されて以来、初めて発生したM9クラスの巨大地震であり、この地震の発生により我々はM9クラスの巨大地震による強震動の実態を初めて知ることになったと言える。本研究では、これまで東北地方太平洋沖地震の強震動を対象として提案されてきた複数の震源モデルを対象に、各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動との誤差を、構造物への影響が大きい帯域を中心に定量的に評価することにより、震源モデルのパフォーマンスに関する定量的な比較を行った。建物被害と対応の良い指標として境ほかにより提案されている「1-2秒震度」の誤

差を全地点に対して平均したものを算出した結果、SMGA モデルでは SPGA モデルに対して 2.2 倍～3.8 倍程度の誤差が生じていることがわかった。これより、巨大地震に対する構造物の耐震検討に用いる入力地震動を策定するための震源モデルとしては、SPGA モデルまたは疑似点震源モデルが適していると考えられる(図 2)。

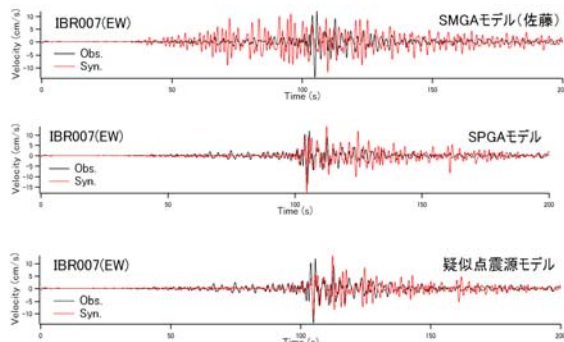


図 2 IBR007 における速度波形 (0.2-1Hz) の各震源モデルによる比較の一例

### (3) 強震動下の地盤災害の解析的評価手法の開発

南海トラフの巨大地震においては、広域にわたり震度 6 強以上の強震動を受けると予測されている。それらの地域には四国山地、紀伊山地などが横たわっており、緊急輸送道路の途絶の要因となり得る斜面は膨大な数に上る。これらの斜面が新潟地震のように復旧に長期間を要するのか、東北地方太平洋沖地震のように短期の復旧が可能であるのかは、崩土の土量、流動量に依存する。したがって、本研究では、地震時の崩土の流動量、土量を評価する手法の確立を目的として、粒子法的一种である Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) 法を用いて地すべりの崩壊シミュレーションを実施しプログラムの改良を行った。

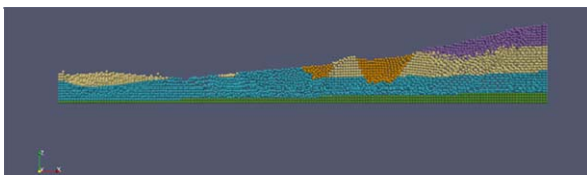


図 3 地すべりの残留変形解析結果

### (4) 地震時流動地盤中の管路挙動解析

本研究では、流動地盤中の埋設管に作用する荷重の評価のための数値解析手法を確立することを目的として、SPH 法の適用を試みた。SPH 法は、本来単一の連続体を対象とした数値解析法であるため、埋設管と地盤との相互作用を考慮した解析を行うためには、特別な解析モデルの設定が必要となる。そこで、本研究では、埋設管を円形の剛体粒子の集合で表現するとともに、SPH 粒子を円形とみなし、個別要素法と同様に接触ばねを導入した解析モデルを設定した。この解析モデルにお

いては、管路に地盤から作用する力は管路の剛体粒子と地盤の SPH 粒子の間のばねに作用する力の合力として算定することができる。

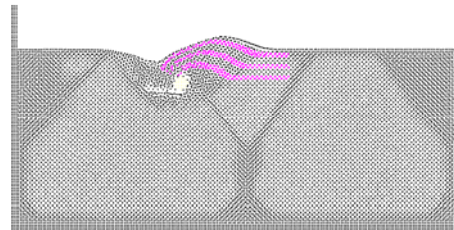


図 4 H/D=2.5 埋設深さによる SPH 粒子の挙動

### (5) 道路盛土の地震時安全性評価

盛土の地震時安全性は、円弧すべりを仮定した Newmark 法により照査するのが一般的である。堤体の地震応答を考慮に入れる場合は、堤体の有限要素解析が必要となる。本研究では、有限要素解析を行わず、等価な 1 自由度モデルを用いて堤体の応答を推定する方法を提案した。提案手法により、堤体の地震応答を考慮した滑動量を簡易に推定することが可能となった。

### (6) 水循環システムの巨大地震対策

東北地方太平洋沖地震における津波による水道施設被害を調査し、課題を抽出した。また、来るべき南海地震において津波の想定浸水域にある水道事業者に対して、津波対策に関するアンケート調査を行い、津波対策の不十分な現状を明らかにした。さらに、内陸の巨大地震に対して、地表面断層が現れた場合を想定した水道管路の対策について定量的に検討を行った。

### (7) 通信基盤設備の耐震評価技術

通信基盤設備に関連して古い設備の耐震性を評価する研究を行った。古い設備には劣化が進んでいる問題と、耐震設計が不十分である問題が混在すると考えて研究を進めた。2 種類のネジ継ぎ手鋼管の強度試験を行った結果、劣化の進んだ管の強度低下が確認され、またネジ部の破壊の進行が明確になった。

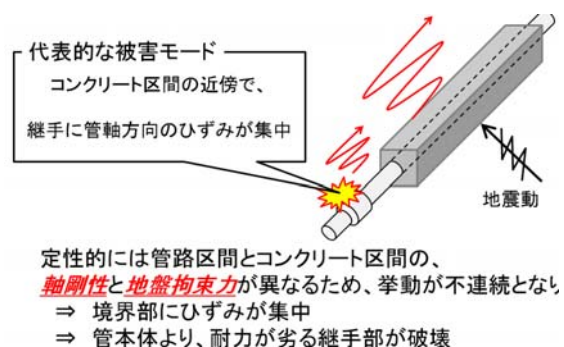


図 5 防護コンクリート区間の被害イメージ



設計上の不備に関し、コンクリート巻きした管路の挙動を明確にする実験と東北地方太平洋沖地震の被害要因分析を行った(図5)。南海トラフ地震に備える基礎的なデータを得ることができた。

(8) 地中ライフラインの液状化損傷メカニズムと補強法

大型遠心力载荷装置を用いた液状化時の埋設管路の動的挙動と作用外力に焦点を当てた模型実験を行い、地盤と管路の相互作用を定量的に評価し、管路の耐震性向上に資する成果を得た。また、新工法として管路上部に三角形の屋根(アングル)をとりつけ、その効果を検討した(図6)。続いて、地盤の飽和度、管路の断面形状を変化させた1G場模型実験と数値解析により、引抜き抵抗と地盤の変形挙動に着目し、管路の耐震設計に資する基礎的データを得た。

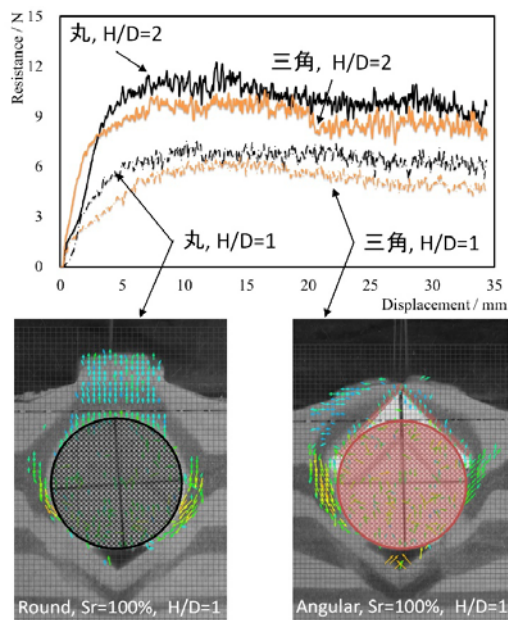


図6 管路の引抜き実験による引抜き抵抗と変位の関係(上段)、管路周辺地盤の変形と画像解析による変位速度ベクトル(下段左:丸鋼管, 下段右:アングル付き鋼管)(飽和度100%)

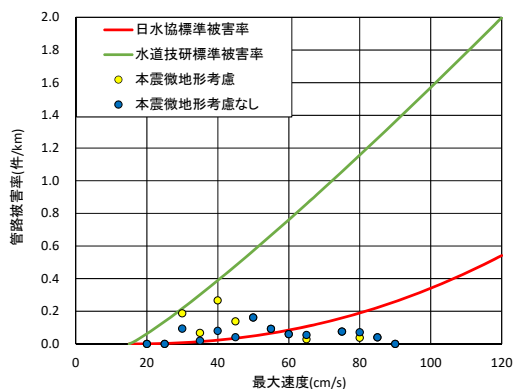


図7 管路脆弱係数を考慮した本震と管路被害率の関係

(9) 被害分析に基づく配水管路脆弱性評価

東北地方太平洋沖地震において福島県いわき市は本震とその一ヶ月後に断層運動にともなう内陸型の誘発地震の強震動に曝された。本震は南海トラフ巨大地震時と同じく、海溝型地震である。本研究では本震、誘発地震の二つの地震による水道管路の被害分析を行い、地震メカニズムによる管路被害の特性について分析を行なった(図7)。

(10) 津波による地盤への影響評価

社会基盤施設の津波安全性指標の開発と減災効果の検討を進めた。東日本大震災の発生以後、巨大津波に対する内陸線状構造物(道路盛土や鉄道盛土)や鉄筋コンクリート建物への減災効果への期待は非常に高まっている。ここでは各施設に対する津波安全性と減災効果について検討を行った(図8)。

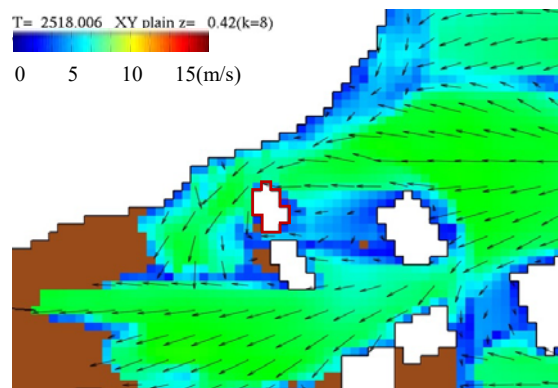


図8 女川町における3次元津波反乱解析

(11) アースダム地震時安全性評価

南海トラフの巨大地震を想定し、M9クラスの2011年東北地方沖太平洋沖地震によって決壊した藤沼ダムを対象とした非線形動的有効応力解析を行った。有限要素法を用いて動的挙動を検討し、地震時のダム決壊の再発防止のための方針を検討した(図9)。地震時の藤沼ダムの挙動を検討するにあたっては、実際に観測された地震動及び模擬地震動を用いた。また、ダム構成要素の力学的挙動はモール・クーロンモデルを考慮した有限要素コードを用いて表し、周波数解析及び動的解析を行った。同解析により、地震時のダム堤体の挙動を示すと同時に、解析結果と実際の事象を比較・検討した。

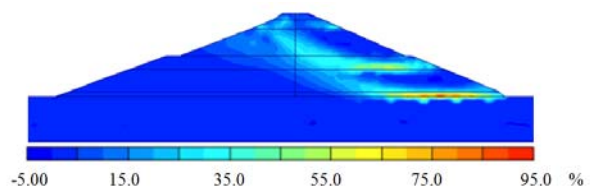


図9 地震動によって生じた堤体のせん断応力分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] 主な論文 (計 10 件)

① 佐伯琢磨、清野純史、地震力と津波波力を同一指標で表した損傷度曲線の提案ーガソリン供給施設への適用に向けてー、地域安全学会論文集、査読有、No. 30、2017、pp. 1-6.

② 佐藤祐子、米山 望、奥村与志弘、清野純史、杭基礎建物の津波転倒メカニズム検討のための三次元津波氾濫解析、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、Vol. 71、No. 2、2016、pp. I\_961-I\_966.

③ 秦 吉弥、村田 晶、野津 厚、羽田浩二、山田雅行、宮島昌克、藤木 昂、常田賢一、2014 年長野県北部の地震における白馬村神城地域での臨時余震観測に基づく強震動の広域評価、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、査読有、72、2016、pp. I\_55-I\_67.

④ 庄司 学、宮崎史倫、若竹雅人、伊藤 陽、鈴木崇伸、通信埋設管路の地震対策に活用するスクリーニング手法の提案及び地震被害関数の構築、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、査読有、Vol. 71、No. 4 (地震工学論文集第 34 巻)、2016、pp. 523-541.

⑤ 野津 厚、多重非線形効果を考慮した簡便な強震動シミュレーション手法の検証とその予測問題への応用方法、日本地震工学会論文集、査読有、第 16 巻、第 4 号、2016、pp. 4\_106-4\_125.

⑥ Tobita, T., Uratani, K., and Ashino, T., Centrifuge study on damage mechanism of buried pipes in the liquefiable ground, International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure, Proc. of the Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Refereed, Vol. 3, No. 2, 2016, pp. 16-19.

⑦ 鎌田泰子、東日本大震災報告書の用語検索によるライフライン相互連関分析、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、査読有、Vol. 72、No. 4、2016、pp. I\_926-I\_933.

⑧ 鈴木崇伸、地震記録から地盤の非線形特性を検出する方法、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、査読有、Vol. 71、2015、pp. 502-510.

⑨ 秦 吉弥、酒井久和、静間俊郎、野津 厚、一井康二、丸山喜久、サイト特性を考慮した推定地震動に基づく堤防道路の通行機能に着目した被害関数の評価ー大規模地震による鳴瀬川堤防の被災を例に一、土木学会論文

集 A1、査読有、Vol. 71、No. 4、2015、pp. I\_894-914.

⑩ 古川愛子、真辺寛人、清野純史、水平で堅固な基礎地盤上に築かれた均質な盛土構造物の地震時滑動量の簡易評価手法に関する研究、土木学会論文集 A2 (応用力学)、査読有、Vol. 70、No. 2、2014、pp. I\_659-I\_669.

[学会発表] 主な発表 (計 10 件)

① 岩橋卓也、Charatpangoon Bhuddarak、清野純史、アースダム決壊に伴う決壊状況解析とその浸水マップ作成に関する研究、平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演、2016 年 6 月 11 日、立命館大学 BKC、滋賀県草津市。

② Miyajima, M., Oda, K. and Kishi, S., Performance of Earthquake Resistant Water Pipe across Surface Faulting, 7th China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 2016. 6. 1-4, Shanghai, China.

③ 飛田哲男、任 建飛、井合 進、異なる断面形状をもつ埋設管路の引抜きに伴う抵抗力と周辺地盤の変形、第 35 回日本自然災害学会学術講演会、2016 年 9 月 20 日、静岡県地震防災センター、静岡県静岡市。

④ Yusuke Ono, Numerical simulation of earthquake-induced landslide, Thailand-Japan Mini-Symposium on Earthquake Engineering, 2016. 21-24, Chiang Mai, Thailand.

⑤ 秦 吉弥、酒井久和、静間俊郎、丸山喜久、常田賢一、湊 文博、堤防道路のフラジリティカーブの評価ー大規模地震による鳴瀬川堤防の被災・無被災実績を例としてー、日本地震工学会第 11 回年次大会梗概集、2015 年 11 月 19-20 日、東京大学生産技術研究所、東京都。

⑥ 錦織洋介、小野祐輔、谷口朋代、SPH 法による流動地盤中の埋設管に作用する荷重の評価、第 67 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集、2015 年 5 月 22-23 日、山口大学工学部、山口県宇部市。

⑦ 熊田光伸、鈴木崇伸、3 次元動的解析による斜橋に添架された通信管路被害の分析、平成 26 年度土木学会全国大会 I 部門、2014. 9. 10-12、大阪大学豊中キャンパス、大阪府豊中市。

⑧ 野津 厚、安田将人、石本健治、山田雅行、1964 年新潟地震の際の新潟市の工学的基盤における地震動の推定、第 49 回地盤工学研究発表会、2014. 7. 12-14、名古屋国際会議場、愛知県名古屋市。

⑨ 藤 圭介、鍬田泰子、東日本大震災における二地震の被害分析に基づく配水管路脆弱性評価、第14回日本地震工学シンポジウム、2014.12.4-6、幕張メッセ、千葉県千葉市。

⑩ 宮島昌克、岩本夏未、東日本大震災における水道施設の津波被害に関するアンケート調査、平成26年度全国会議(水道研究発表会)、2014年10月29日、名古屋市国際会議場、愛知県名古屋市。

[図書] (計6件)

① Masanori Hamada (Chief Edt.), Takeshi Koike, Takanobu Suzuki, Charles Scawthorn (Editors): Critical Urban Infrastructure Handbook, CRC Press, 2014, ISBN9781466592049.

② 伊津野和行、酒井久和、森北出版、Excelではじめる数値解析、2014、ISBN9784627096318.

③ Kyaw, Z. L., Pramumijoyo, S., Husein, S., Fathani, T. F., and Kiyono, J., 2014, Investigation to the Local Site Effects during Earthquake Induced Ground Deformation Using Microtremor Observations in Yogyakarta, Central Java-Indonesia, © Springer International Publishing Switzerland, K. Sassa (ed.), Landslide Science for a Safer Geo-Environment, Vol. 3, 2014, pp 241-249.

④ 奥村与志弘、東日本大震災合同調査報告土木編3 ライフライン施設の被害と復旧、土木学会、丸善出版、2015、ISBN 978-4-8106-0863-2、鍬田分筆(第1章1, 2. 11, 2. 12, 3. 2, 4. 3, 5. 11, 5. 12)、337.

⑤ Yoshihiro Okumura, H. R. Riggs and Junji Kiyono: Toward a Resilient Society Against a Mega-Tsunami Disaster, In: Takeshi Katsumi and Shizuka Hashimoto (Eds), Towards Future Earth: Challenges and Progress of Global Environmental Studies, Kaisei Publishing Co., Ltd., 2016, pp. 171-189.

⑥ 奥村与志弘、災害情報学事典、日本災害情報学会編、朝倉出版、2016、pp. 250-251.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清野 純史 (KIYONO, Junji)  
京都大学・地球環境学堂・教授  
研究者番号: 00161597

(2) 研究分担者

宮島 昌克 (MIYAJIMA, Masakatsu)  
金沢大学・環境デザイン学系・教授  
研究者番号: 70143881

(3) 連携研究者

鈴木 崇伸 (SUZUKI, Takanobu)  
東洋大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50256773

(4) 研究協力者

酒井 久和 (SAKAI, Hisakazu)  
法政大学・デザイン工学部・教授  
研究者番号: 00360371

(5) 研究協力者

野津 厚 (NOZU, Atsushi)  
(独) 港湾航空技術研究所・  
地盤構造部・主任研究官  
研究者番号: 60371770

(6) 研究協力者

飛田 哲男 (TOBITA, Tetsuo)  
関西大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00346058

(7) 研究協力者

小野 祐輔 (ONO, Yusuke)  
鳥取大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00346082

(8) 研究協力者

鍬田 泰子 (KUWATA, Yasuko)  
神戸大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50379335

(9) 研究協力者

古川 愛子 (FURUKAWA, Aiko)  
京都大学・地球環境学堂・准教授  
研究者番号: 00380585

(10) 研究協力者

奥村 与志弘 (OKUMURA, Yoshihiro)  
京都大学・地球環境学堂・助教  
研究者番号: 80514124

(11) 研究協力者

ブッダラック チャラットパングーン  
(Bhuddarak Charatpangoon)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 90750761