

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月13日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21310118

研究課題名（和文）地震動のトランポリン効果の発生メカニズムの解明

研究課題名（英文）Investigation of the generating mechanism of the trampoline effect on ground motion

研究代表者

青井 真 (AOI SHIN)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号：80360379

研究成果の概要（和文）：本研究では、地震に伴う大加速度の上下動地震波形記録に見られる顕著な非対称性の原因であると考えられているトランポリン効果の発生メカニズムを実験的手法及び数値計算的手法により解明した。現地調査で得られた知見を基に、振動台で砂や大鋸屑などの試料を充填した土槽を上下に揺らす実験や、数値シミュレーションに基づく物理モデルを構築することで、観測された顕著な非対称性の再現に成功するとともに、この現象には媒質の粒状性と弾性の双方が深く関与していることを示した。

研究成果の概要（英文）：Recently, distinct asymmetries of the up-down ground acceleration, which cannot be explained by conventional soil response theorem, have been observed in source area of the reverse-type earthquake fault. In this research, we have investigated the mechanism of ‘trampoline effect’ which is the origin of this asymmetry by experimental and numerical method. We have successfully reproduced the asymmetric motions by both the table shaking experiments and the numerical simulations, and shown that both the granularity and the elasticity play important roles when the vertical ground motions become asymmetric.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 8,700,000  | 2,610,000 | 11,310,000 |
| 2010年度 | 3,700,000  | 1,110,000 | 4,810,000  |
| 2011年度 | 3,000,000  | 900,000   | 3,900,000  |
| 総計     | 15,400,000 | 4,620,000 | 20,020,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：地震、自然現象観測・予測、非線形、地盤工学、固体地球物理学

## 1. 研究開始当初の背景

断層近傍強震動の特徴を知ることが地震防災上きわめて重要であり、減災対策を立てる場合に何を考慮する必要があるのかを我々に教えてくれる。このような研究をする上で必須となる断層近傍強震波形データは、大地震の発生頻度が低く対象地域が狭いことから、収録の機会はきわめて希であり、断

層近傍の地震動の大きさ（振幅）や波形の特徴については、十分な知見が得られていない状況であった。日本においては、1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）で震度7に相当するいわゆる「震災の帯」の中で強震波形が得られなかった反省に立って、政府が主導して高密度な強震観測ネットワーク（K-NET、KiK-net、自治体震度情報

ネットワークなど)の整備を全国規模で進めてきた結果、徐々に断層近傍のデータが蓄積されつつある。

耐震設計は主に水平動に基づいて考えられており、上下動が考慮されることはあまりない。これは、構造物は  $1g (= 980gal)$  の重力による荷重(自重)に余裕度を持って耐える設計になっていることに加え、これまでに記録された殆どの強震加速度記録において上下動が水平動より大きいことによる。しかし 2008 年岩手・宮城内陸地震での断層近傍記録は上下動が水平動に比べ 2 倍以上大きかったことから、逆断層直上においては耐震設計に於いても上下動成分を考慮する必要が指摘されている (O'Connell, 2008, Science)。

このような背景の下、大加速度地震時に上下動が既存の理論に比べ 2 倍以上大きくなる現象を説明可能なトランポリン効果の物理モデルを構築し、将来の地震動予測に繋げることは地震防災上極めて重要である。

## 2. 研究の目的

2008 年岩手・宮城内陸地震 (M<sub>JMA</sub> 7.2) の際、断層直上の防災科研 KiK-net 一関西観測点において重力加速度の 4 倍を超える極めて大きな加速度が記録された。この記録は大加速度であることに加え、上向き加速度が下向きに比べ 2.5 倍以上大きいという顕著な非対称性を持っている点で特異であり、弾性波動論に基づく既存の線形及び非線形地盤応答理論では説明することが出来ない。申請者らのグループは、この非対称現象をトランポリン効果と名づけ、本質的にはトランポリン運動により説明可能とするコンセプトモデルを提案した (Aoi et al., 2008, Science)。本研究においては、このモデルを実験的手法及び数値計算的手法により検討し、トランポリン効果の発生メカニズムの究明を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、大加速度時における地震動のトランポリン効果の発生メカニズムを究明し、物理モデルの構築するため、Aoi et al. (2008) により提唱された、「トランポリン上の弾性体の運動」というコンセプトモデルを、現地観測・振動台実験・数値シミュレーションの三つの研究要素によって物理モデルへ進化させる。

- ①<現地観測>トランポリン効果が発生した KiK-net 一関西観測点において、微動観測・ボーリング調査を行い、②の振動台実験と③の数値シミュレーションのための物理定数及び浅層地盤構造モデルを同定する。
- ②<振動台実験>現行の 4000gal および本研究で新規開発する 8000gal 対応の加速度

地震計を設置した土槽に、砂や土などの試料を入れた振動台実験を行い、トランポリン現象を再現する瞬間を捉えるとともに、その発生メカニズムを究明する。

- ③<数値シミュレーション>数値シミュレーションに基づく物理モデルを構築し、表層地盤がどのようなメカニズムで粒状体の性質を帯びるのか、また、非対称性を示す条件などに関して研究を進める。

## 4. 研究成果

### ①<現地観測>

2008 年岩手・宮城内陸地震 (M<sub>JMA</sub> 7.2) の際に、重力加速度の 4 倍を超える極めて大きな加速度が記録された断層直上の KiK-net 一関西観測点周辺における微動観測を行い、浅部 S 波速度構造の推定を行った。微動観測は、2009 年 5 月～8 月にかけて KiK-net 一関西観測点 (IWTH25) 周辺にて単点による微動観測 (合計 210 地点) および微動アレイ観測 (4 アレイ) を実施した。単点による微動探査による H/V スペクトル比の周期毎のピーク倍率を面的に確認したところ、一関観測点の近傍においてのみ 10～15Hz の卓越周期が 3 倍前後と大きく、その他の位置においてはこの周期範囲のピークについてほとんど確認することができなかったことから、表層地盤が急激に変化していることが分かった。また、一関観測点直近での観測結果における位相速度から計算される S 波速度構造推定値から、表層数 m の S 波速度構造は現在想定していた半分以下であることが分かった。

さらに、本震前後及び本震時の地表/地中スペクトル比の解析から、水平動だけでなく、上下動でも 5Hz 以上でピーク周波数のシフトなどスペクトル比の形状が変化したことが分かった。本震前、本震時、本震後の地盤構造をモデル化したところ極表層においては P 波速度が本震によって大きく低下し、強震動による地盤の状態変化が本震後も残留していたことが分かった。

また、2011 年東北地方太平洋沖地震において K-NET 築館観測点をはじめ広範囲で実測された大加速度の地震動データを解析した。

### ②<振動台実験>

非対称な地震動の定量的な計測と物理モデルをめざした振動台実験を行うための予備実験を行った。内径 200mm、高さ 500mm の円筒形の土槽にガラスビーズ等の試料を入れ上下加振した。概ね  $1g$  以上の大振幅加振において試料が粒状的な振る舞いをし、宙に浮く現象が見られ、各深度に設置した加速度計から得られた波形は振幅が概ね重力加速度を超えると非対称なものとなり、その傾向は深度の浅い加速度計ほど顕著であった。

計測された加速度は 8g を超える大きなものであり、地震観測用の加速度計では振り切ってしまうことが分かった。また、重力加速度が大きくなると加速度計の移動や傾斜により測定が困難になるが、高速カメラを用いた画像解析により、大加速度時においても正確な計測が出来る可能性が示された。

初回の予備実験を踏まえ、より高加速度まで測定可能なセンサを新たに用いた実験を行った。振動台実験は実際の現象と比較して規模が小さいため、豊浦砂のような硬質な試料による振動台実験で見られる衝撃的なパルス波は地震時に観測されたものとは異なる性質を持っている。一方、粒状性だけでなく弾性を併せ持つ、大鋸屑を試料として実験を行ったところ、より観測データに近い波形が再現された。このことからトランポリン現象においては粒状性と弾性の両方が本質的に重要な要素であることが分かった。

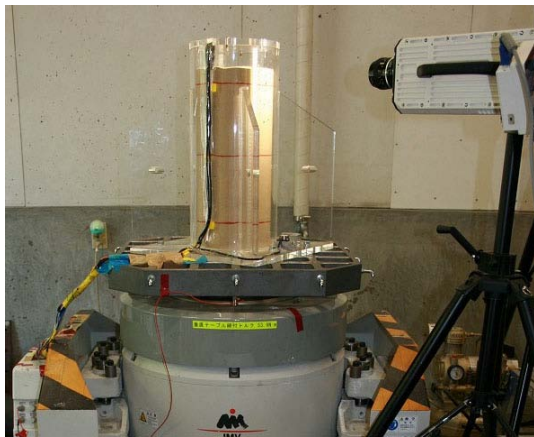


写真1：振動台実験の様子。試料である大鋸屑を充填し振動台に設置した透明アクリル土槽（中央）及び高速カメラ（右上）。

三回にわたる予備実験を踏まえ、振動台土槽実験によるトランポリン効果の再現の本実験を行った。当初は、広い帯域にわたり極めて高精度な特性をもつバネ振り子による負帰還型の加速度センサを用いていたが、想定より大加速度を生じること、またセンサのサイズが大きいため実験結果に影響を与えている可能性があることが分かった。これらの問題を解決するため、より大加速度まで測定可能かつ小型な圧電素子タイプのセンサを用いることとした。圧電素子タイプは負帰還型の加速度計と比較して、センサ毎の感度や周波数特性のばらつきが大きいだけでなく、安定的に測定可能な周波数範囲が狭いため、適切な特性の補正やフィルタリングなどの後処理が重要となることが分かった。また、高加速度で振動させた場合に試供体が粒状化しセンサが転倒したり浮き上がることに

より実験に大きな影響が出ていたが、これまでの経験を踏まえセンサ設置治具や結線方法を工夫することで、波形への影響を最小限にとどめることに成功した。これまでの実験を通じ、振動センサと高速カメラという二つの手法での実験手法を確立し、実際に大加速度時に観測されたトランポリン効果の再現に成功するとともに、トランポリン効果の再現には、試供体の粒状性のみならず弾性が重要な役割を果たしていることが新たに分かった。

一方、1g 場での実験では模型地盤の拘束圧が小さく定量的な再現が困難であることを踏まえ、地中の応力状態を実物に合わせることが出来る遠心力载荷装置を用いることを視野に入れ、通常用いられる縮尺よりも大きな縮尺で実験することができる「拡張型相似則」の提案と検証を行い、地盤強度・加速度・過剰間隙水圧・変位について相似則の適用性を示した。

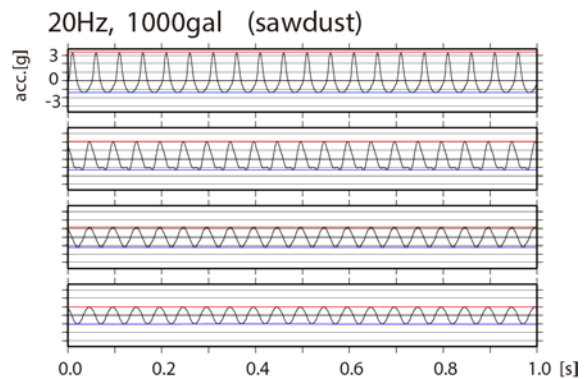


図1：大鋸屑試料による振動台実験により得られた波形の例。土槽の上部ほどトランポリン効果による非対称性が顕著である。

### ③<数値シミュレーション>

粒状体の物理に立脚する構成則を採用した数値解析プログラム FLIP を用い一次元地震応答解析を行ったところ、地表面および地中の鉛直加速度にパルス状の上向き加速度が現れた。ただし、実験で観測された振幅に対し、50%程度と過小評価であり、非対称な上下動を定性的には再現できているものの、段階では実験結果の振幅まで再現するには至っていない。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計9件）

- ① Susumu Iai, Tetsuo Tobita and Osamu Ozutsumi, Induced fabric under cyclic and rotational loads in a strain space multiple mechanism model for granular

- materials、International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics、37、査読有、2013、150-180.
- ② 青井真、功刀卓、鈴木亘、森川信之、中村洋光、先名重樹、藤原広行、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、地震第2輯、査読有、64、2012、169-182.
- ③ Hiroyuki Kumagai, Nelson Pulido, Eiichi Fukuyama, and Shin Aoi、Strong localized asperity of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Japan, Earth Planets Space、査読有、64、2012、649-654.
- ④ Susumu Iai, Kyohei Ueda, Tetsuo Tobita and Osamu Ozutsumi、Finite strain formulation of a strain space multiple mechanism model for granular materials、International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics、査読有、2012、doi:10.1002/nag.2084.
- ⑤ Susumu Iai, Tetsuo Tobita and Osamu Ozutsumi、Evolution of fabric in a strain space multiple mechanism model for granular materials、International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics、査読有、2012、doi:10.1002/nag.2087.
- ⑥ 青井真、功刀卓、鈴木亘、森川信之、中村洋光、藤原広行、東北地方太平洋沖地震で観測された強震動、日本地震工学会誌、査読無、15、2011、25-28.
- ⑦ Wataru Suzuki, Shin Aoi, and Haruko Sekiguchi、Rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake derived from near-source strong motion records、Bulletin of the Seismological Society of America、査読有、100、2010、256-266.
- ⑧ Tetsuo Tobita, Susumu Iai, and Tomotaka Iwata、Numerical analysis of near-field asymmetric vertical motion、Bulletin of the Seismological Society of America、査読有、100、2010、1456-1469.
- ⑨ 青井真、地震動の非対称性の発見とトランポリン効果、科学、査読無、79、2009、366-370.
- [学会発表] (計 21 件)
- ① Shin Aoi, Takashi Kunugi, Wataru Suzuki, Nobuyuki Morikawa, Hiromitsu Nakamura, and Hiroyuki Fujiwara、Strong motion characteristics of the 2011 Tohoku-Oki earthquake observed by K-NET and KiK-net、9th U.S.-Japan Natural Resources Panel on Earthquake Research、2012年10月10日、Denver, USA
- ② 青井真、功刀卓、鈴木亘、森川信之、藤原広行、東北地方太平洋沖地震の特徴、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012年05月22日、幕張メッセ国際会議場 (千葉県)
- ③ 青井真、地震観測最前線ー震災軽減を目指してー、日本地学オリンピック とつぷ・レクチャー (招待講演)、2012年03月25日、産業技術総合研究所共用講堂 (つくば市)
- ④ Shin Aoi, Takashi Kunugi, Wataru Suzuki, Nobuyuki Morikawa, Hiromitsu Nakamura, Nelson Pulido, Hiroyuki Fujiwara、Strong motion characteristics of the 2011 Tohoku-Oki earthquake observed by K-NET and KiK-net、2011 Fall Meeting of American Geophysical Union (招待講演)、2011年12月08日、San Francisco, USA
- ⑤ Shin Aoi, Takashi Kunugi, Wataru Suzuki, Nobuyuki Morikawa, Hiromitsu Nakamura, Nelson Pulido, Katsuhiko Shiomi, and Hiroyuki Fujiwara、Strong motion characteristics of the 2011 Tohoku-oki earthquake from K-NET and KiK-net、2011 Annual Meeting of Seismological Society of America、2011年04月15日、Memphis, USA
- ⑥ 青井真、功刀卓、藤原広行、地震動におけるトランポリン効果とその再現実験、大加速度・速度の強震動の生成と地震被害に関する研究集会、2011年1月19日、キャンパスプラザ京都 (京都府)
- ⑦ Nelson Pulido、青井真、鈴木亘、Simulation of extreme ground motions during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake、大加速度・速度の強震動の生成と地震被害に関する研究集会、2011年1月19日、キャンパスプラザ京都 (京都府)
- ⑧ 鈴木亘、青井真、関口春子、曲面断層モデルによる震源インバージョン、大加速度・速度の強震動の生成と地震被害に関する研究集会、2011年1月19日、キャンパスプラザ京都 (京都府)
- ⑨ Tetsuo Tobita, Susumu Iai, and Tomotaka Iwata、Site response studies on extreme vertical ground motions beyond 1g、5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering、2011年01月10-13日、Santiago, Chile
- ⑩ Shin Aoi, Takashi Kunugi, and

- Hiroyuki Fujiwara、Shaking table experiment of trampoline effect、2010 AGU Fall Meeting、2010年12月13日、Moscone Center, San Francisco, USA
- ⑪ 木村美帆、浅野公之、岩田知孝、KiK-net 一関西の水平動と上下動の地盤震動特性、第13回日本地震工学シンポジウム、2010年11月18日、つくば国際会議場（茨城県）
- ⑫ 青井真、功刀卓、藤原広行、トランポリン効果の再現実験、日本地震学会2010年秋季大会、2010年10月27日、広島国際会議場（広島県）
- ⑬ Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara、Trampoline effect under extreme ground motions、8th Joint Meeting of UJNR Panel on Earthquake Research、2010年10月20-22日、Nagaoka, Niigata, Japan
- ⑭ Tetsuo Tobita, Susumu Iai, Tomotaka Iwata, Shin Aoi, and Koji Hada、Numerical analysis of trampoline effect in extreme ground motion、Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics、2010年05月24日、San Diego, USA
- ⑮ 先名重樹、青井真、飛田哲男、功刀卓、藤原広行、KiK-net 一関西観測点 (IWTH25)におけるボーリング調査結果と地盤構造モデルの推定、日本地球惑星科学連合2010年大会、2010年5月23日、幕張メッセ国際会議場（千葉県）
- ⑯ 青井真、大加速度の地震動に伴うトランポリン現象（招待講演）、岩盤工学研究会講演会、2010年4月23日、神戸大学（兵庫県）
- ⑰ Miho Kimura, Kimiyuki Asano, and Tomotaka Iwata、Amplification characteristics during the strong and weak ground motions at the IWTH25 station, northeast Japan、2009 AGU Fall Meeting、2009年12月17日、Moscone Center, San Francisco, USA
- ⑱ Nelson Pulido, Luis Dalguer, and Shin Aoi、Dynamic fault rupture model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Japan: Role of rupture velocity changes on extreme ground motions、2009 AGU Fall Meeting、2009年12月17日、Moscone Center, San Francisco, USA
- ⑲ 木村美帆、浅野公之、岩田知孝、KiK-net 一関西観測点における強震時および弱震時の表層地盤の震動特性、日本地震学会2009年秋季大会、2009年10月22日、京都大学（京都府）

- ⑳ 先名重樹、青井真、浅野公之、岩城麻子、木村美帆、岩田知孝、功刀卓、中村洋光、藤原広行、飛田哲男、高野征宣、微動探査による KiK-net 一関西観測点 (IWTH25) 周辺における浅部 S 波速度構造の推定、日本地震学会2009年秋季大会、2009年10月22日、京都大学（京都府）
- ㉑ 飛田哲男、井合進、岩田知孝、震源近傍における鉛直動の片揺れ現象に対する数値解析、第44回地盤工学研究発表会、2009年8月18日、関東学院大学（神奈川県）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：孔内固着装置

発明者：中村洋光、功刀卓、松尾一郎、梶原透、飯沼博幸

権利者：独立行政法人防災科学技術研究所、応用地質株式会社、応用地震計測株式会社

種類：特許

番号：2009-241430（特開 2011089790）

出願年月日：2009年10月20日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.bosai.go.jp/activity\\_special/the\\_third/ev/member/aoi/index.html](http://www.bosai.go.jp/activity_special/the_third/ev/member/aoi/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青井 真 (AOI SHIN)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号：80360379

(2) 研究分担者

功刀 卓 (KUNUGI TAKASHI)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 地震・火山防災研究ユニット・主任研究員

研究者番号：70414414

藤原 広行 (FUJIWARA HIROYUKI)

独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域・災害リスク研究ユニット・総括主任研究員

研究者番号：80414407

先名 重樹 (SENNA SHIGEKI)

独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域・災害リスク研究ユニット・客員研究員

研究者番号：90500447

中村 洋光 (NAKAMURA HIROMITSU)

独立行政法人防災科学技術研究所・社会防

災システム研究領域・災害リスク研究ユニット・主任研究員  
研究者番号：60426004  
飛田 哲男 (TOBITA TETSUO)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：00346058  
井合 進 (IAI SUSUMU)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：20359780

浅野 公之 (ASANO KIMIYUKI)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：80452324

(3) 連携研究者

岩田 知孝 (IWATA TOMOTAKA)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：80211762