

地震動の非対称性の発見とトランポリン効果

青井 真 あおい しん

(独立行政法人防災科学技術研究所 地震研究部 地震観測データセンター 強震観測管理室長)

地震に伴う地面の動き(地震動)には極性の偏りはないと考えられてきた。しかし、2008年6月に起きた岩手・宮城内陸地震の際に断層極近傍で観測された地震動は、上向きの加速度が下向きに比べて2倍以上も大きいという極端な非対称性を示した。このような地震動は、弾性波動論にもとづく既存の地盤応答理論では説明できないものである。

観測された不思議な非対称性

2008年6月の岩手・宮城内陸地震は、両県にまたがる浅い逆断層型の起震断層がすべることにより発生した地震であり、防災科学技術研究所(以下、防災科研)が運用する基盤強震観測網KiK-net⁽¹⁾の観測点のうち、断層中央部直上に位置するいちのせきにし一関西観測点において4022 gal(galは cm/s^2 と同義)という非常に大きな加速度が記録された(図1(a))。この地震記象のきわめて特異な点は、上向きの地震動の振幅が下向きの2倍以上も大きいという、明瞭に上下非対称な波形形状を示していることである⁽²⁾。

図1(a)の最下段に示した最大振幅を含む1秒間の加速度波形を使い、この非対称性を詳しく見

ていくことにする。振幅に関しては、上向きの加速度が下向きに比べて大きいだけでなく、下向き加速度は概ね $-1g$ (g は重力加速度980 gal)で頭打ちしている。また、パルスの幅に関しては、下向きのほうが上向きに比べて広いことがわかる。つまり、上向きパルスの振幅は大きいとその継続時間は短く、逆に下向きは、振幅は小さくその継続時間は長い。このため、加速度の振幅と周期(パルス幅)という2種類の非対称性により、その積分値は1周期ごとに概ね相殺している。

この観測点では表層の軟弱な地盤の影響を避けて観測を行うことを目的に、岩盤に達する深さ260 mの観測井戸の底にも地中強震計が設置されているが、地中記録には上で述べたような非対称性は見られない(図1(b))。このことから、上下対称な地震動が表層地盤に入射し、地表に達するまでの伝播経路で何らかの作用を受けることで非対称性が生まれたと考えられる。

他の記録においても同様な現象が見られるかどうかを確認するため、10年以上にわたって記録されてきた20万以上の記録からなる防災科研の強震記録データベース(K-NETとKiK-net)の中から、 $1g$ 以上の加速度を記録した14個の地震記象を解析したところ、明瞭な非対称性を示す

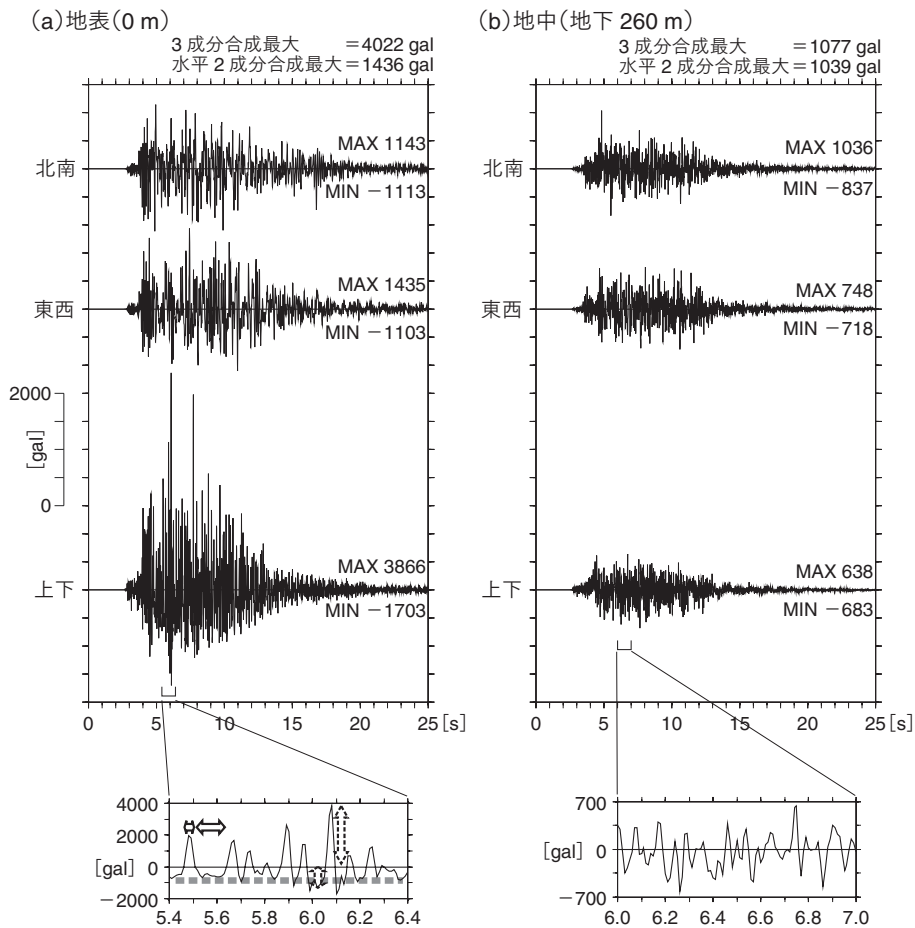


図1 — Kik-net 一関西観測点で記録された加速度記録(左は地表, 右は地中 -260 m). 波形右側に示した MAX, MIN はそれぞれプラス(北, 東, 上)方向, マイナス(南, 西, 下)方向の最大加速度(gal). 最下段は, 下動に関し, 最大値を含む1秒間の波形の拡大図. 地表の拡大図中の矢印は振幅(点線)と周期(実線)の非対称性を, 太点線は $-1g$ の頭打ちを示す.

ものが新たに2つ見つかった. 同様な非対称性が他の地震記録に見られることから, これらは大加速度の条件下で比較的一般的な現象であることが示唆される.

“トランポリン”のような挙動

地震に伴って震源断層から放出された地震波は, 地下の岩盤や地盤を伝播してわれわれの足元までやってくる. 地震動は地震波の伝播現象によるものであり弾性波動方程式により記述されると考えられてきた. しかしながら, 今回発見された上下対称な地震動が入力したにもかかわらず非対称な地震動を生じるという現象は, これまでに知られている線形および非線形の波動伝播理論では説明

できないものである.

今回観測された非対称な地震動は, トランポリン上で跳ねている物体の運動に類似していることから, 筆者ら⁽²⁾はこの現象を説明するためにトランポリンモデルを提唱した. 物体がトランポリンから反発力($>1g$)を受けている時間は短い但其の力は大きく, 逆に, 宙に浮いて重力加速度($1g$)による下向きの力のみを受けて自由落下している時間は長い. その挙動は振幅と周期という2つの非対称性をもつ上に, 下向きの加速度が概ね $1g$ で頭打ちするという点でも, 観測事実とも整合的である(図2(a)).

弾性体がトランポリンのような挙動を示す理由として, 表層付近の地盤が大加速度の入力により弾性限界を上回る張力場にさらされて, 媒質が破

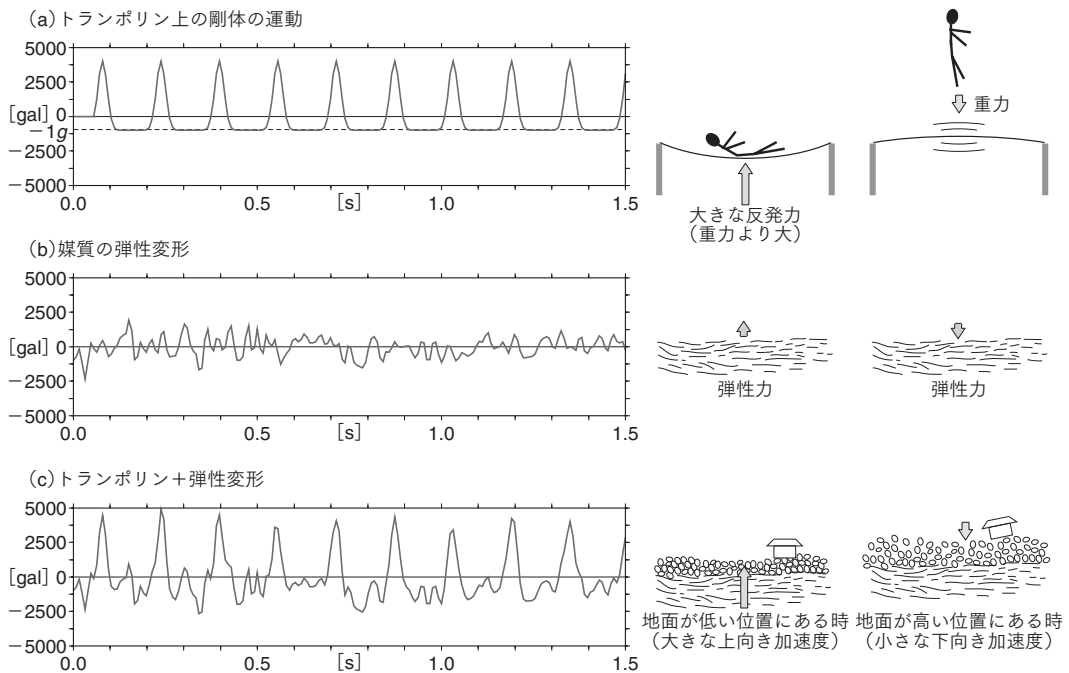


図2—(a)トランポリン上の剛体運動を単純化したモデル。(b)媒質の弾性変形。(c)トランポリン上の剛体運動と媒質の弾性変形の和。KiK-net 一関西観測点で記録された地表加速度上下動の特徴(振幅と周期の非対称性)をよく再現している。

壊されたり伸張クラックが生じたりすることにより、部分的に粒状体的な性質をもつことが考えられる。側面と底面を拘束された粒状体(たとえば砂箱)は、上向きの加速に対しては固まりとして振る舞い、弾性的な性質をもつ。一方、下向きの加速に対しては、その加速度が小さい場合においては上向きの場合と同様な振る舞いが期待されるが、その加速度が重力加速度を超えると、もはや固まりとして振る舞うことができず、砂同士の相互作用が極端に小さくなり、粒状体的な振る舞いが卓越する。もちろん、強震動時の表層媒質は、完全に粒状化するわけではないため、弾性的な振る舞い(図2(b))と粒状的な振る舞い(図2(a))の中間的な振る舞い(図2(c))となると考えられる。図2(c)に示すトランポリンモデルによる模擬波形は、図1(a)の最下段に示した観測波形の拡大図の性質をよく再現している。

非線形性とトランポリン効果

地球の表面を覆う地殻は浅いほど軟弱であり、

地下深くで起こった地震の波がその軟弱地盤に入射すると、増幅されてその振幅は大きくなる。その増幅のされ方は、小さな地震動(弱震)の場合と、大きな地震動(強震)の場合で同じかという、そうではない。表層地盤に非常に大きな振幅の地震波が入射すると、地盤の応答はもはや線形弾性体では近似できないくらい大きなひずみが生じ、弱震時に比べその増幅の程度は小さくなる。このような現象は、地盤応答の非線形性(nonlinearity)⁽³⁾として古くより知られているが、近年の断層近傍強震記録の蓄積により、1990年代に多くの研究がなされている。図3(a)に示した本震(強震)と余震(弱震)における水平動の増幅率は大きく異なっている。強震時は弱震時に比べその増幅率が低減し、また、増幅率のピーク周波数が低周波数側にシフト(長周期化)しているが、これらは地盤応答の非線形挙動時に見られる典型的な特徴である。もしも非線形効果が存在せず、地盤応答が大振幅に対しても線形応答をしたとすれば、水平動の最大加速度も理論的には4000 galを大きく超えることになるが、現実には非線形効果によ

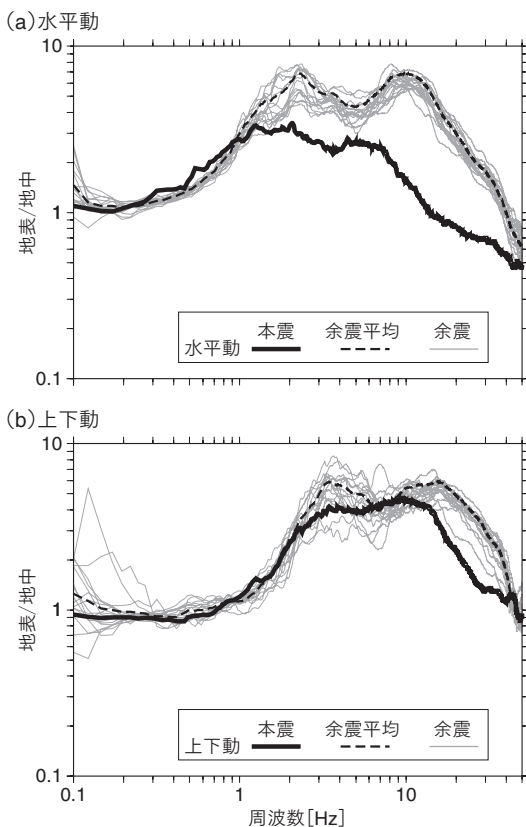


図3—KiK-net—関西観測点における、地上と地中の加速度波形のフーリエスペクトル比((a)水平動, (b)上下動)。灰色細線および点線はそれぞれ、余震の比およびそれらの平均を、太線は本震の比を示す。地表波形と地中波形のフーリエスペクトル比は、近似的に表層による増幅率と見なせる。

る振幅の低減によりそのような大振幅とはならず、2000 gal を大きく超える地震動が記録された事例はきわめてまれである。

これに対して上下動では、強震と弱震での増幅率の差はさほど大きくない。地震に伴う地震動は通常水平動が上下動に比べて大きいことから、地震危険度評価においては多くの場合水平動のみが、また、P波(縦波)に比べ振幅の大きなS波(横波)のみが主に考慮されてきた。しかしながら、今回記録された地震動は、水平動に比べ上下動が大きなものであり、その最大値はP波による影響が大きかった可能性がある。剪断応力によるS波が卓越する水平動では、媒質に蓄積された大きなひずみに比例した応力が生じないという非線形効果により、観測される地震動の大きさにはそれほど大きくはならない。一方、体積変化を伴うP

波が卓越する上下動においては、伸張(引っ張り)ひずみが生じる下向き加速度に対しては応力の低減が生じるものの、圧縮ひずみが生じる上向き加速度に関しては比較的大きな応力を生じさせることが可能である。つまり、非線形効果による上下動の増幅率低減の程度が低いことにより、結果として大きな加速度を生じたと考えられる。“トランポリン”の言葉のイメージから、何らかの増幅効果がイメージされるが、増幅の程度はあくまで、非線形挙動(強震時)

<トランポリン効果(強震時上下動)

<線形挙動(弱震時)

であり、弱震時に比べればその増幅率が小さいのである。ただし、強震時には増幅率が小さくなるものの、揺れの大きさ自体は弱震時に比べれば当然大きい。

まとめ

2008年6月に発生した岩手・宮城内陸地震の際に震源断層直上で記録された重力加速度の4倍を超える地震動記録には、これまで知られていなかった上下非対称性が見られた。このような現象を説明するために、地盤が示す挙動をトランポリンのような性質をもつものとして説明する新しい物理モデルを提示した。大振幅の地震動が入力すると地盤応答が非線形化し、その増幅率が低減することは従来より知られていたが、その影響は主にS波で構成される水平動において顕著である。上下動においては非線形化の影響は小さく、大振幅においても比較的増幅率が保たれる。これは、大振幅においても上向きの加速度がほぼ線形の関係で大きくなるためであると考えられ、トランポリン効果により上下動の増幅率の低減が阻止されることにより、大加速度が生じていると解釈することができる。

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、トランポリン効果を生じるのかは具体的には明らかにはなっていない。重力加速度を大きく超えるような強震動記録はきわめて珍しいた

め、このような現象が生じる条件を系統的に検討することは困難であるが、大加速度記録であっても上下非対称性が見られない記録もある。重力による圧密が進んだ媒質中では、粒子同士の凝着や粘着による相互作用により粒状化しにくいいため、ごく表層の砂質土、礫、軟岩における現象であることが想像されるが、入力地震動の振幅だけでなく、周波数特性や継続時間など、いくつかの条件が組み合わさって起こると考えられる。観測記録の解析だけでなく、振動台実験や数値シミュレーションなどのアプローチを組み合わせ、今後研究を進めていく必要がある。

今回 $4g$ を超える加速度を記録した地震動は、

卓越周波数が 10 Hz 前後と高周波数であったため被害に直結するものではないが、大振幅地震動の観測事例が少ないことから、断層極近傍ではまだわれわれの知らない現象が発生する可能性がある。断層近傍における観測記録をより多く蓄積するとともに、その地震動特性を明らかにしていくことが防災上重要である。

文献

- (1) S. Aoi et al.: Eos Trans. AGU, **81**, S71A-05(2000)
- (2) S. Aoi et al.: Science, **322**, 727(2008)
- (3) I. M. Idriss & H. B. Seed: Bull. Seismol. Soc. Am., **58**, 2013(1968)