

2008年岩手・宮城内陸地震の地震動の特徴 —非対称な地震動とトランポリン効果—

青井 真*・功刀 卓*・藤原広行**・森川信之**・鈴木 亘*

Strong Motions of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake — Asymmetric Ground Motion and Trampoline Effect —

Shin AOI*, Takashi KUNUGI*, Hiroyuki FUJIWARA**, Nobuyuki MORIKAWA**, and Wataru SUZUKI*

*Earthquake Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
aoi@bosai.go.jp, kunugi@bosai.go.jp, wsuzuki@bosai.go.jp

**Disaster Prevention System Research Center,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
fujiwara@bosai.go.jp, morikawa@bosai.go.jp

Abstract

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, earthquake (June 14, 2008, 8:43 JST; 39.0N, 140.9E, depth 8 km by the Japan Meteorological Agency; Mw 6.9) was a reverse-fault crustal earthquake with a source region extending 30 km in strike and 20 km in dip directions. Associated with this earthquake, the K-NET and KiK-net strong motion networks recorded accelerations at 330 and 325 stations, respectively, and the largest peak ground acceleration (PGA) reported to date, 4,022 gal was recorded on the free-surface at KiK-net IWTH25 station (West-Ichinoseki). The station was set in a stiffed soil (S-wave velocity = 450 m/s), and located on the hanging-wall site of the fault with 3 km southwest of the epicenter. Contrary to the typical observations that horizontal ground motions are larger than vertical ground motions, vertical PGA (3,866 gal) at this site is more than twice the horizontal one (1,436 gal). The waveform and envelope of the up-down (U-D) component at the surface are strongly asymmetric with respect to the horizontal zero-axis, whereas the remaining surface and downhole (GL -260 m) components are broadly symmetric. A simple model describing a mass bouncing on a trampoline qualitatively reproduces the distinct asymmetric character of the observed record. In this article, we summarize strong ground motions and rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi earthquake, and point out the trampoline effect in extreme ground motion at KiK-net IWTH25 station.

Key words : 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, trampoline effect, 4g, asymmetric ground motion, KiK-net

1. はじめに

2008年6月14日8時43分に発生した2008年岩手・宮城内陸地震(北緯39.0度, 東経140.9度, 深さ8km, $M_{JMA}=7.2$; 気象庁)では, 岩手県奥州市や宮城県栗原市で震度6強を記録し, 死者17名, 全半壊家屋176棟(消防庁, 2009/7/2 現在)にのぼる被害に見舞われた。断層域は都市部から離れていたことから建物等の被害は比較的小なかったものの, 荒砥沢ダムをはじめとする栗駒山

周辺の大規模な土砂崩落や, 宮城県栗原市の多数の堰き止め湖など, 山間部特有の大きな震災被害を生んだ。本稿では, 岩手・宮城内陸地震の断層直上で記録された大加速度波形を中心に, 地震動の特徴を報告する。

2. 地震の概要

岩手・宮城内陸地震は北西傾斜の逆断層であり, 防災科学技術研究所(防災科研)Hi-netにより推定された余

*独立行政法人 防災科学技術研究所 地震研究部

**独立行政法人 防災科学技術研究所 防災システム研究センター

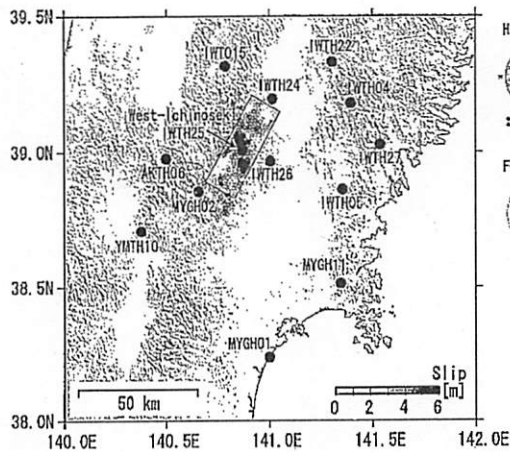


図1 震源インバージョンにより推定された2008年岩手・宮城内陸地震に伴うすべり分布³⁾。星印は破壊開始点を示す。青丸は、Hi-netの再検測による本震後約24時間の余震分布。震源メカニズムはF-netのモーメントテンソル逆解析及び、Hi-netのP波押し引き分布による。

Fig. 1 Slip distribution estimated from source inversion analysis³⁾. The star indicates the rupture starting point. The blue circles indicate the epicenters of the aftershocks that occurred in approximately 24 hours following the mainshock. The source mechanisms are determined from the P-wave polarity analysis using the Hi-net data and the F-net moment tensor inversion.

震分布から、断層面の大きさはおよそ strike 方向に 30km, dip 方向に 20km 程度であると考えられる。また、断層から概ね 50 km 以近の K-NET および KiK-net¹⁾²⁾ の断層近傍の強震動波形記録を用いた震源過程のインバージョン解析の結果(図1)から、破壊は主に南側の浅い方に進展し、最も大きなすべり(アスぺリティ)は破壊開始点の南 8~9 km 付近に推定されている³⁾。

この地震に伴い、防災科研が全国に展開する K-NET および KiK-net ではそれぞれ 330 点、325 点の合計 655 観測点で記録が得られ(図2)、そのうち、KiK-net 一関西(IWTH25)及び KiK-net 一関東(IWTH26)、KiK-net 東成瀬(AKTH04)における揺れは震度 6 強相当であった。図3に、最大加速度(PGA)及び最大速度(PGV)の観測値と、司・翠川⁴⁾による距離減衰式との比較を示す。断層近傍の数観測点を除いては最大加速度・最大速度共に、距離減衰式と良い相関があり、今回の地震に伴う地震動は全体としては平均的な大きさだったことが分かる。KiK-net 東成瀬(AKTH04)の地震動が大きいのは、地中(GL-100m)からの増幅が大きいためであり、極表層の増幅が原因と考えられる。

3. KiK-net 一関西観測点における強震動

KiK-net は、平成9年に地震調査研究推進本部によって策定された地震に関する基盤的調査観測計画の一環として、防災科研により整備された強震観測網である。KiK-net は、地表だけでなく深度 100 m 以上の観測井戸底にも強震計を持つ全国規模の鉛直アレイ観測網であり、

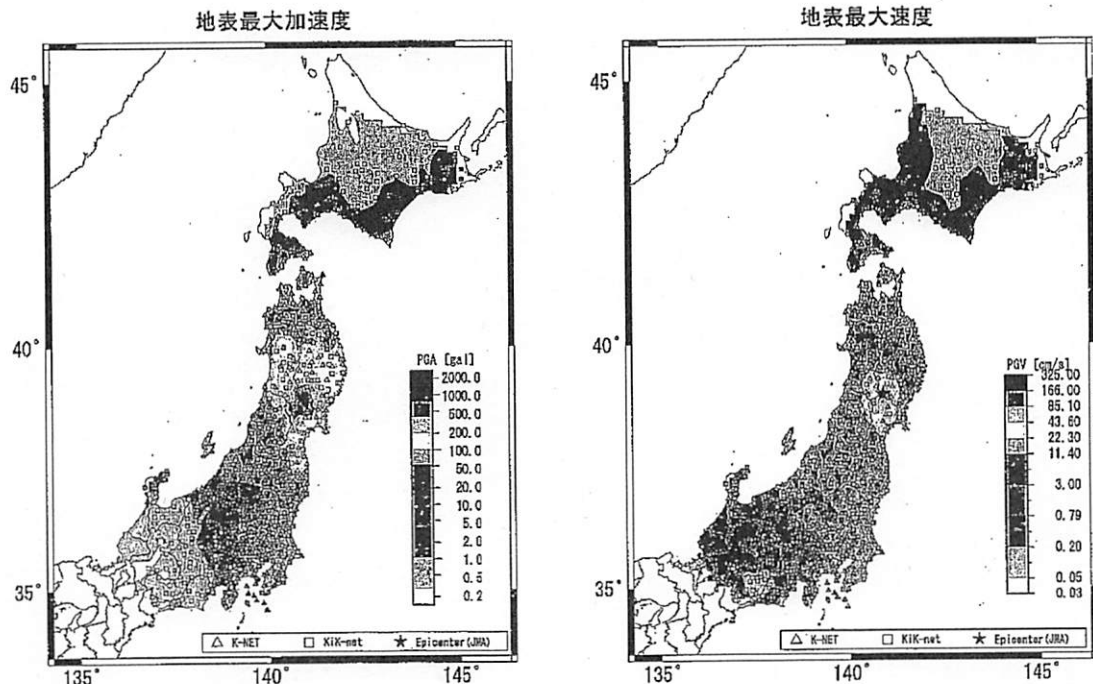


図2 強震観測網(△: K-NET, □: KiK-net)により観測された地表における最大加速度(左図)及び最大速度(右図)の分布
Fig. 2 Distribution map of peak ground accelerations (left) and velocities (right) observed by K-NET (triangles) and KiK-net (squares).

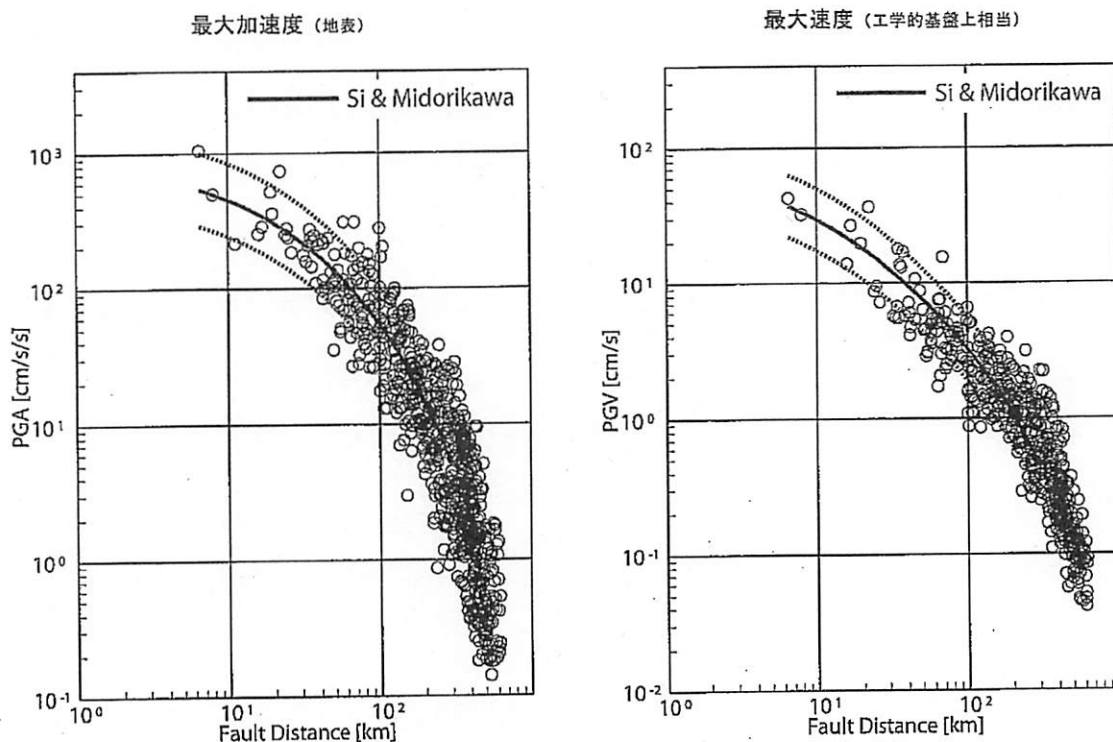


図3 最大加速度及び最大速度の観測値と距離減衰式⁴⁾との比較。左図は地表における最大加速度、右図はS波速度が600 m/sの工学的基盤相当に変換した最大速度を示した。ここでの最大加速度、最大速度はいずれも水平動二成分のうちの大きい方の値を用いている。

Fig. 3 Observed peak accelerations on the ground (left) and velocities corresponding to the values at engineering bedrock (right) compared with the empirical attenuation relation⁴⁾.

表層の増幅効果を定量的に評価できる。整備開始から十年が経過し、機器が老朽化してきたことに加え、より迅速なデータの取得に対する社会の要請に応えるため、平成19年度末までに全観測点の地上機器が更新された。更新に伴い、最大計測レンジが2,000 galから4,000 galへと拡大された。

KiK-net 一関西観測点(IWTH25)は震央距離約3 km、逆断層上盤側のほぼ断層中央部に位置し、三成分合成で4,022 galという非常に大きな加速度を記録した(図4)。この地域は火山地帯に属し、KiK-net 一関西観測点は、磐井川により形成された河岸段丘(河川面から約80 m)に位置する。観測井戸掘削時の記録によると、凝灰角礫岩などの火砕岩の上に、厚さ30 m余りの段丘堆積物が載っており、最表層は表土に覆われている。

岩手・宮城内陸地震の際のKiK-net 一関西観測点における加速度波形の最大値は、南北、東西成分がそれぞれ1,143 gal, 1,435 gal(水平二成分合成で1,436 gal)、上下動成分が3,866 galであり、三成分合成では4,022 galと重力加速度(980 gal)の4倍を超えており、おそらく自由表

面(free surface)における地震記録としてはこれまでに観測された最大のものである(図4)。通常の地震記録では、水平動が上下動に比べ2倍程度振幅が大きいという特徴を有する。Vsが1,800 m/sを超える凝灰岩類中に設置された地中観測点(深度260 m)においても南北、東西、上下成分がそれぞれ1,036 gal, 748 gal, 683 galを記録し、三成分合成では1,077 galであり、工学的基盤(建築物の支持基盤、概ねVs=300~700 m/s)以深ですでに振幅が大きかったことが分かる。このことは、アスペリティからの距離が近かったことに加え、断層の上盤に位置していたことによると考えられる。加速度記録の包絡線の継続時間は10秒程度であるが、これは、断層破壊の継続時間と概ね整合的である。

KiK-net 一関西観測点の地表における本震の加速度波形は、振幅が大きく、また下記に述べる通り片揺れの傾向があったため、その設置条件に関する問い合わせを数多くいただいた。図5に示した平面図にあるように、KiK-net 一関西観測点の観測小屋(写真1a)は2 m×3 m程

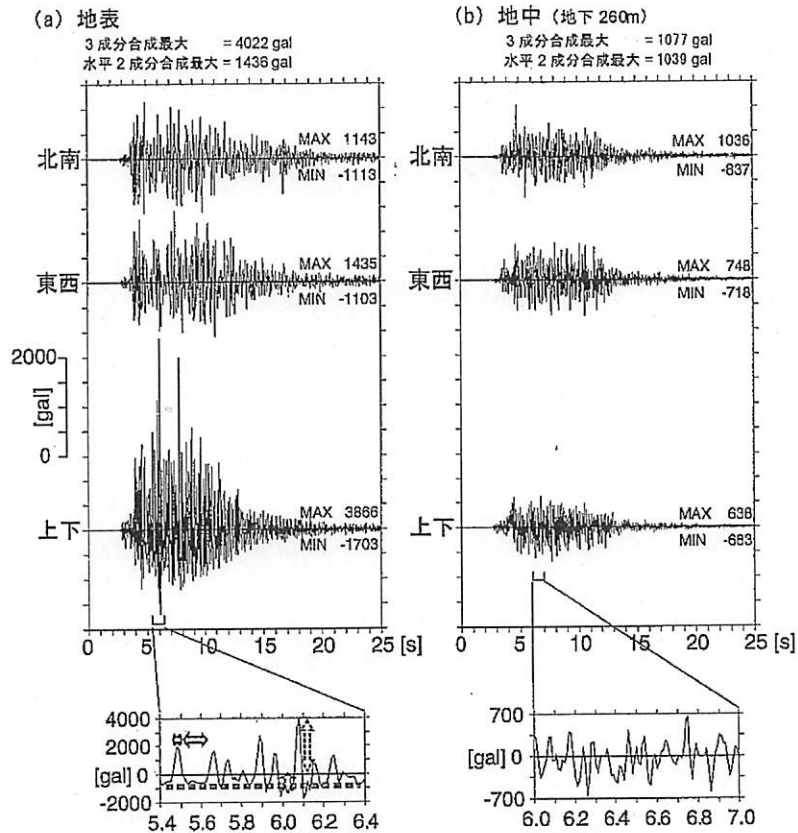


図4 KiK-net 一関西観測点で記録された加速度記録 ((a): 地表, (b): 地中, GL -260m). 最下段は, 上下動に關し, 最大値を含む1秒間の波形の拡大図. 地表の拡大図中の矢印は振幅(点線)と周期(実線)の非対称性を, 太点線は-1gの頭打ちを示す.

Fig.4 Acceleration records observed by (a) surface and (b) borehole sensors of KiK-net IWTH25 station. The bottommost panels are closeup of 1-s vertical waveforms including the maximum acceleration. For the vertical motion on the surface, the amplitude and period show the asymmetric characteristics as indicated by the dotted and solid arrows, respectively, and the downward motion does not exceed about -1g as indicated by the dotted line.

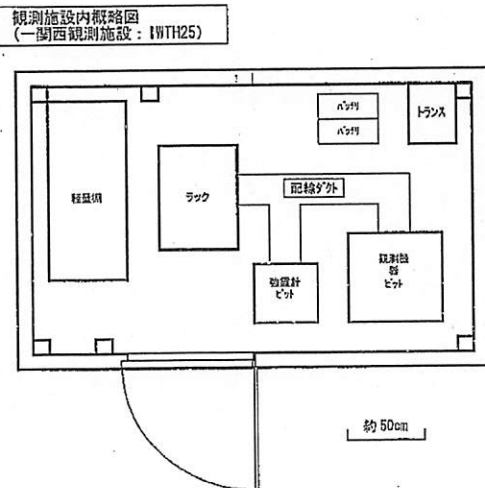


図5 KiK-net 一関西 (IWTH25) 観測点の観測施設の概略図. 「強震計ビット」と表示された位置に, 深さ 45 cm 程度のビットが設置されており, その底に地表設置加速度計が固定されている. ビットは, 振動しないようにコーキング剤で固定された金属製の蓋で閉じられている. 「ラック」に AD 装置, 収録装置, 通信装置等が収納されており, 地震発生時にデータが自動的に防災科研にある強震観測センターに送信される.

Fig. 5 Layout of observation system in the observatory building of KiK-net IWTH25 station.

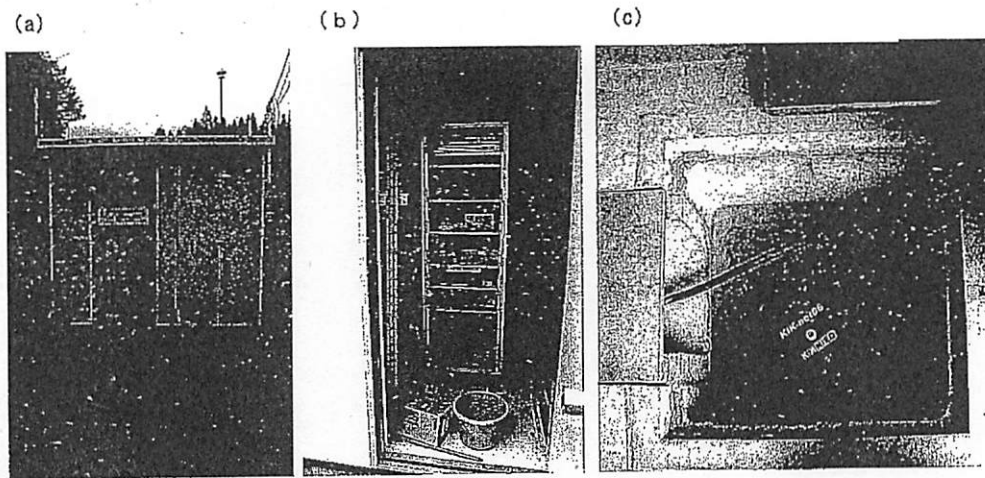


写真1 (a) KiK-net 一関西 (IWTH25) の外観。図5の概略図に示す扉の方向から撮影。(b) 地震1週間後に初めて立ち入った際に撮影された観測小屋内の様子。バケツやほうきが倒れている程度で、計量棚やアンカー止めされたラックが倒れるなど、観測波形に影響を及ぼす可能性のある状況の発生は見取れない。(c) 地表(ピット内)の加速度計の設置状況。右上に写っているのは、金属製のピット蓋。ピットの四隅に、蓋を固定していたコーキング剤で、地震後においても、片手では開かないくらい強固に固定されていた。

Photo 1 (a) Observatory building of KiK-net IWTH25 station (b) Inside of the building observed the week after the mainshock (c) Accelerograph installed in the pit.

度の大きさであり、現場打ちの厚さ約50 cmのコンクリート製の基礎と一体設計のピット(写真1c)が小屋の床に設置されている。また、地表加速度計はピット床にアンカー止めされた厚さ約10 mmのステンレス製プレートにボルトで固定されている。ピットは、振動しないようにコーキング剤で固定された金属製の蓋で閉じられているため、地震時の震動で散乱した物体が直接地震計に触れる可能性はない。地震後の現地調査では、ピットや地表加速度計の固定状況も含め、特に異常は認められなかった(写真1b)。KiK-net 一関西観測点では、本震後に起きた最大加速度が1,000 galを超える地震も含め数多くの余震が記録されており、それらのデータにも特に不自然な点は見受けられない。

4. 観測された地震動の非対称性とランボリン効果

この地震記録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、明瞭な上下非対称な波形形状を示していることである³⁾。図4a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、下向きの方が上向きに比べ広いことが分かる。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、

振幅は小さくその時間は長い。加速度の振幅と周期(パルス幅)という二種類の非対称性により、その積分値は一周毎に概ね相殺されている。

IWTH25 観測点の地中強震計は、岩盤に達する深さ260 mの観測井戸の底に設置されているが、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4b)。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、十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個の地震記録を解析したところ、明瞭な非対称性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。

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我々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、上下対称な地震動が入力したにも関わらず非対称な地震動を生じるという今回発見された現象は、波動伝播理論に基づく既存の線形及び非線形地盤応答モデルでは説明できないものである。

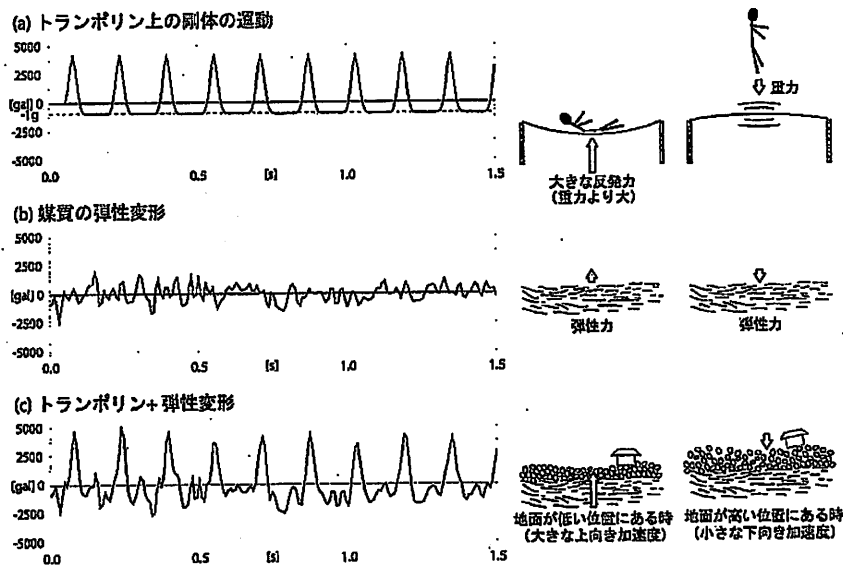


図6 (a) トランポリン上の剛体運動を単純化したモデル (b) 媒質の弾性変形 (c) トランポリン上の剛体運動と媒質の弾性変形の和, KiK-net 一関西観測点で記録された地表加速度上下動の特徴 (振幅と周期の非対称性) をよく再現している。

Fig. 6 (a) Motion of the mass on trampoline (b) Deformation of the elastic media (c) Summation of the trampoline motion and elastic deformation.

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、Aoi *et al.* (2008)³⁾ はこの現象を説明するモデルとして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とその力は大きく、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二つの非対称性を持つ上に、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 6a)。

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持つことが考えられる。側面と底面を拘束された粒状体 (例えば砂箱) は、上向きの加速に対しては固まりとして振る舞い、弾性的な性質を持つ。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 6b) と粒状的な振る舞い (図 6a) の中間的な振る舞い (図 6c) となると考えられる。図 6c

に示したトランポリンモデルによる模擬波形は、図 4a 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。

5. 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、地下深い場所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ることにより振幅は大きくなる。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点、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出来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) (Makino) として古くより知られているが、断層近傍強震記録の蓄積を背景に、90年代に多くの研究がなされた。図 7a に示した本震 (強震) と余震 (弱震) における水平動の増幅率 (正確には地表と地中の観測記録のスペクトル比) 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は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 $4,000 \text{ gal}$ を大きく超えることになるだ

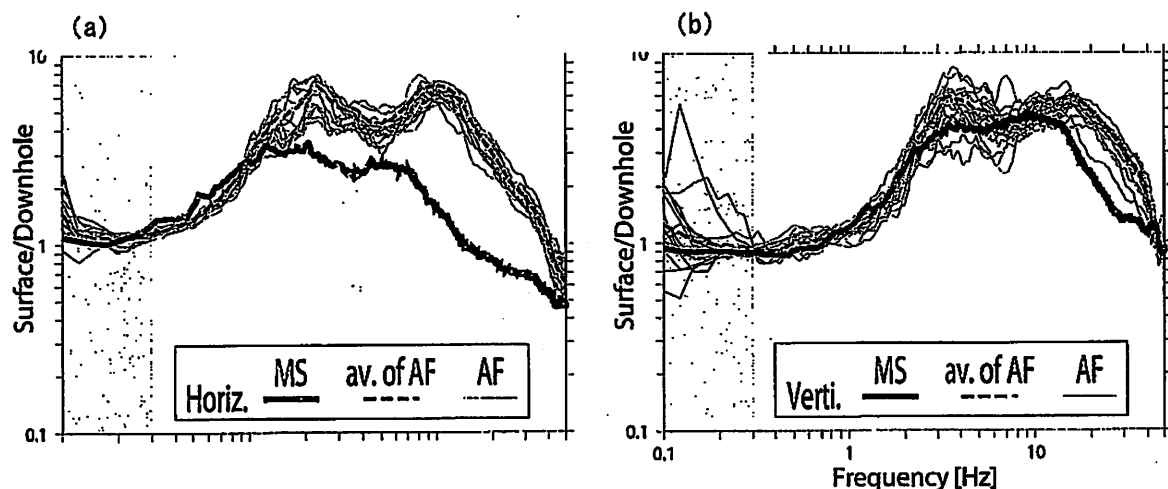


図7 KiK-net 一関西 (IWITH25) 観測点における、地上と地中の加速度波形のフーリエスペクトル比 (a): 水平動, (b): 上下動)。灰色細線及び点線はそれぞれ、10 - 100 gal の余震 (16 個) の比及びそれらの平均を、太線は本震の比を示している。地表波形と地中波形のフーリエスペクトル比は、近似的に表層による増幅率と見なせる。これらは全て 1 オクターブ幅で平滑化されている。0.3Hz 以下では S/N が不十分であるため、スペクトル比の精度がない余震もある。

Fig. 7 Fourier spectral ratio of the surface acceleration to borehole one for (a) horizontal and (b) vertical records of KiK-net IWITH25 station. Black, thin gray, and dotted lines correspond to the ratios for the mainshock, for aftershocks (16 in total) and for the average of the aftershocks, respectively.

ろうが、現実には非線形効果による振幅の低減によりそのような大振幅とはならず、2,000 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 (図 7b)。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、あくまで、増幅率の大小関係は、

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。

6. 変位波形の特徴及び永久変位

KiK-net で使用されている観測機器は、長周期側の周波数特性は平坦で直流成分 (DC 成分) まで収録可能であるため、十分に振幅が大きい場合には数値積分により永久変位を求めることが出来る。図 8 に示した変位波形は、地表における加速度記録に基線補正を施しながら 2 回積分することで得たもので、地震波到来 (概ね 8:43:46) から十数秒で各成分とも一定値に達している。上方向 (隆起) の永久変位が最も大きく、約 140 cm であった。また、水平方向の永久変位は、北方向に 44 cm、東方向に 45 cm であり、水平 2 成分の合成は 63 cm、3 成分の合成は 153 cm であった。上下方向の変位は、地震波到来から単調に増加しつづけて約 9 秒後に最大隆起量である 163 cm に達し、その後若干沈降に転じ、永久変位量である 140 cm に収束している。これらの永久変位は、断層破壊が地表に達していない地点のものとしては非常に大きな値である。一般に加速度記録を積分する際の基線補正には任意性があるため、積分により推定される永久変位は一意ではない。しかし、本解析においては、IWITH25 から数百 m の位置に設置されていた東北大学の GPS 観測点 (ICNS、一関市・祭時)⁷⁾ において得られたデータを元に独立に解析された永久変位量 (図右の小矢印) とほぼ整合しており、

Displacement at KiK-net IWTH25 on the surface

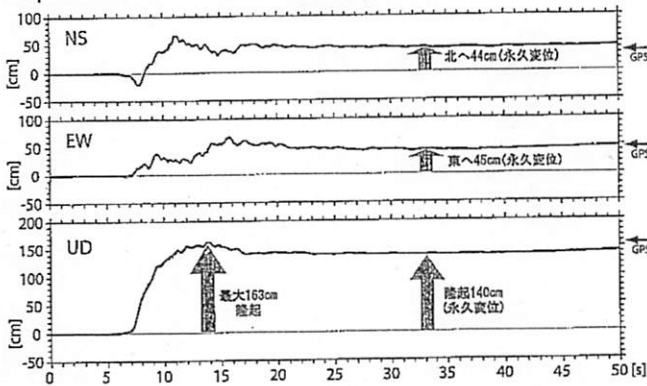


図8 岩手・宮城内陸地震の際に KiK-net 一関西 (IWTH25) 観測点の地表における変位波形。原記録である加速度記録に基線補正を施しながら2回積分することで得られる。図右の小矢印は、IWTH25 から数百 m の位置に位置する東北大学の GPS 観測点 (ICNS, 一関市・祭時) において得られた永久変位⁷⁾。上下方向の変位は、地震波到来から単調に増加しつつ約9秒後に最大隆起量である163cmに達し、その後若干沈降に転じ、永久変位量である140cmに収束している。水平方向の永久変位は、北方向に44cm、東方向に45cmであり、水平2成分の合成は63cm、3成分の合成は153cmであった。

Fig.8 Displacement waveforms of KiK-net IWTH25 surface station derived from the double integration of the original acceleration records with baseline correction. Rightmost arrows indicate the static displacement observed by the GPS station (ICNS) of Tohoku University⁷⁾, which is located a few hundred meters from IWTH25 station.

推定の信頼性は高いといえる。最近では1秒GPSなどの高サンプリングの変位記録が得られるようになりつつあるが、震源過程が10秒余りのイベントにおいては、より高いサンプリングレート (KiK-net の場合 100 Hz) の変位記録が得られる加速度記録からの積分法は震源過程の解明等に有効である。

7. 過去の被害地震との比較

図9に、岩手・宮城内陸地震の波形と、2004年新潟県中越地震及び1995年兵庫県南部地震の代表的な波形との比較を示す。岩手・宮城内陸地震のKiK-net一関西観測点の加速度は、他の被害地震と比べても非常に大きいことが分かる。逆断層の上盤側で、かつ、大きなすべり領域の近傍に位置していたことを反映し、速度波形には上向きの特徴的な長周期パルスが見て取れる。このパルスは、上記で述べた周期数秒の変位ステップに相当する。しかしながら、最大速度自体は、他の地震に比べ大きいわけではない。一関西観測点の観測波形は、他に比べ最大加速度の割には最大速度は小さく、短周期成分が卓越

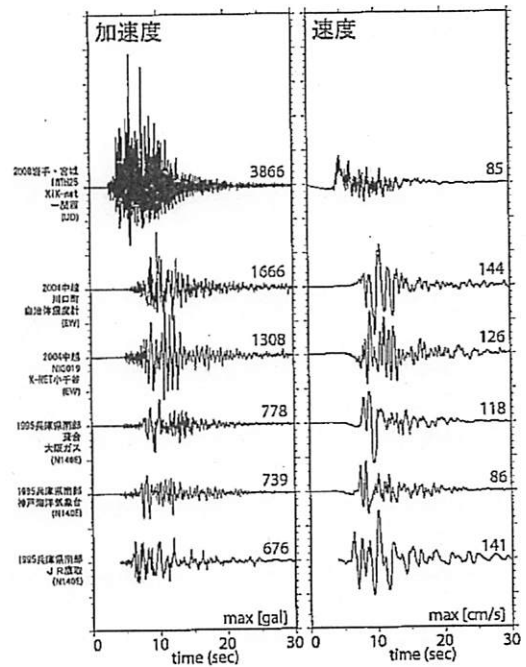


図9 2008年岩手・宮城内陸地震のKiK-net一関西 (IWTH25)、2004年新潟県中越地震の川口町 (新潟県自治体震度計)、K-NET小千谷 (NIG019)、1995年兵庫県南部地震の葛合 (大阪ガス)、神戸海洋気象台 (気象庁)、鷹取 (JR) の(左)加速度記録、(右)速度記録

Fig.9 Comparison of the acceleration (left) and velocity (right) waveforms observed at KiK-net IWTH25 during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, at Niigata Prefecture Kawaguchi-machi and K-NET NIG019 during the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake, and at Osaka Gas Fukiai, JMA Kobe, and JR Takatori during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake.

していることを反映している。伯野⁸⁾は、断層極近傍の地震動の特徴として、短周期に富むこととそれに伴う大加速度の可能性を指摘している。

1995年兵庫県南部地震以降の顕著な地震記録に関して、最大加速度と最大速度の関係を図10に示した。図中に、等価卓越周波数(最大加速度/最大速度/2π)が0.5, 1, 2, 5 Hzとなる直線を点線で示した。木造住宅などの一般構造物に対する破壊力が大きいと考えられる、兵庫県南部地震の震源近傍点 (⑪⑫⑬) や鳥取県西部地震のK-NET日野 (⑨)、中越地震の川口町 (③) は、等価卓越周波数が0.5ないし2.0 Hzであるのに対し、今回の一関西 (①) や中越地震余震の川口町 (⑥) は等価卓越周波数が5.0 Hzを超える非常に高い値を示している。計測震度を算出する際のフィルターは概ね0.6 Hz付近にピークを持ってお

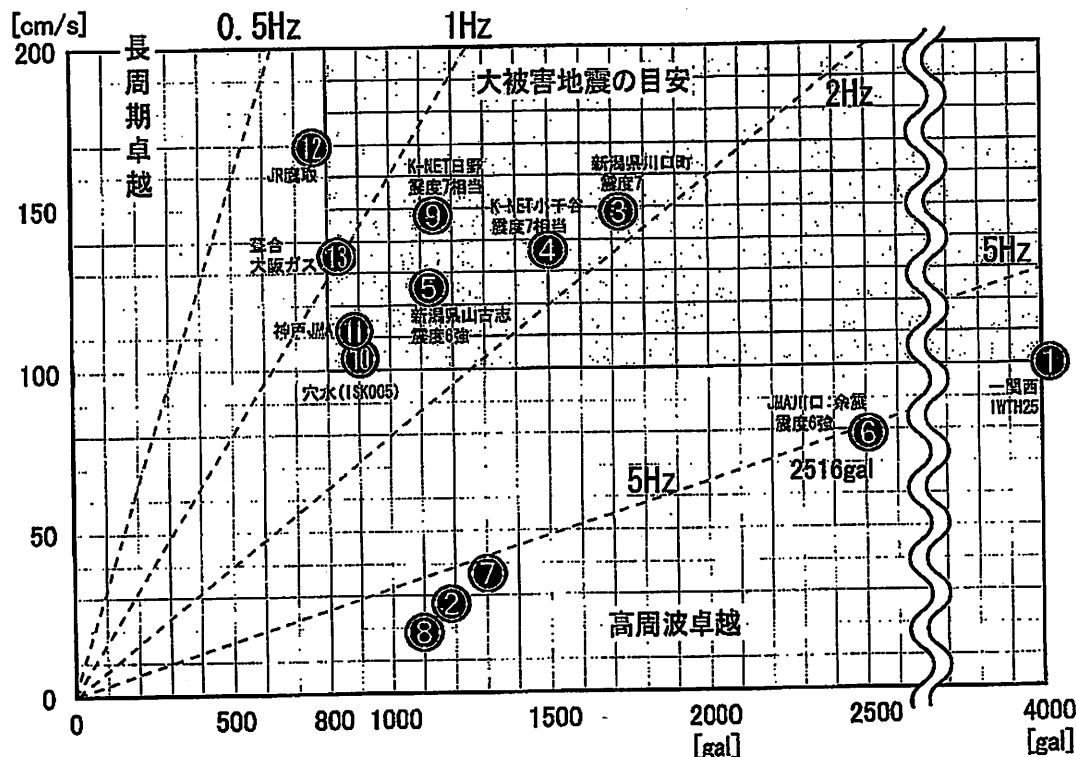


図 10 2008 年岩手・宮城内陸地震 (①KiK-net 一関西: IWTH25), 2008 年岩手県沿岸北部の地震 (②KiK-net 玉山: IWTH02), 2004 年新潟県中越地震 (③新潟県自治体震度計川口町, ④K-NET 小千谷: NIG019, ⑤新潟県自治体震度計山古志村), 2004 年新潟県中越地震最大余震 (⑥新潟県自治体震度計川口町), 2003 年宮城県沖地震 (⑦KiK-net 住田: IWTH04, ⑧KiK-net 陸前高田: IWTH27), 2000 年鳥取県西部地震 (⑨KiK-net 日野: TTRH02), 2007 年能登半島地震 (⑩K-NET 穴水: ISK005), 1995 年兵庫県南部地震 (⑪神戸海洋気象台(JMA), ⑫JR 鷹取, ⑬荻合 (大阪ガス)). グレーのハッチで示したのは最大速度が 100cm/s 以上かつ最大加速度が 800gal 以上の領域で, 川瀬 (1998)⁹⁾ が提案した構造物に対し大きな被害がでる目安である. 点線は, 等価卓越周波数 (最大加速度/最大速度/ 2π) が 0.5, 1, 2, 5Hz である線を示す.

Fig. 10 Diagram of the maximum acceleration versus maximum velocity observed during several large earthquakes in Japan: 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake ((1) KiK-net IWTH25), 2008 Northern Iwate earthquake ((2) KiK-net IWTH02), 2004 Mid Niigata prefecture earthquake ((3) Niigata Prefecture Kawaguchi-machi, (4) K-NET NIG019, (5) Niigata Prefecture Yamakoshi-mura), largest aftershock of the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake ((6) Niigata Prefecture Tottori Kawaguchi-machi), 2003 Off Miyagi earthquake ((7) KiK-net IWTH04, (8) KiK-net IWTH27), 2000 Western Tottori earthquake ((9) KiK-net TTRH02), 2007 Noto Hanto earthquake ((10) K-NET ISK005), 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake ((11) JMA Kobe, (12) JR Takatori, (13) Osaka Gas Fukiai). In the gray area, the acceleration exceeds 800gal and the velocity exceeds 100cm/s, which is proposed as a measure of ground motion causing a heavy damage on buildings⁹⁾. Dotted lines indicate the equivalent peak frequencies ((peak acceleration)/(peak velocity)/ 2π) of 0.5, 1, 2, and 5 Hz.

り, 計測震度が大きな地震動の等価卓越周波数は概ね 0.5 ないし 2.0 Hz 程度である場合が多い. そのような地震動は, 厚い堆積層による増幅やディレクティブティーによる大振幅(キラールパルス)によるものが多い. グレーのハッチで示したのは最大速度が 100 cm/s 以上かつ最大加速度が 800 gal 以上の領域で, 川瀬⁹⁾ が提案した構造物に対し大きな被害がでる目安である. この目安の意味することは, 最大加速度・最大速度のいずれかのみが大き

くても被害には結び付きにくいということである. 実際, 最大加速度のみが大きかった中越地震余震(川口町)では大きな被害は見られていない.

岩手・宮城内陸地震では, 大きな加速度の割には被害が少なかったとの報道もある. ただし, KiK-net 一関西観測点における記録の等価卓越周波数は高かったとはいえ最大速度が 100 cm/s を越えており, 震度も 6 強相当であったことから, 単に加速度が大きいただけではなかった

と言える。集落の戸数が少ないため被害に関する統計的な議論が難しいが、少なくとも観測点付近には全壊家屋も見受けられ、専門家による議論が今後必要であろう。

8. おわりに

本稿では、2008年岩手・宮城内陸地震の逆断層直上に位置する KiK-net 一関西観測点で記録された大加速度波形を中心に、地震動の特徴をまとめた。この観測点では、地表では上下成分において 3,866gal (三成分合成では 4,022 gal)、また V_s が 1,800 m/s を超える凝灰岩類中に設置された地中観測点においても南北成分で 1,000 gal を超えるなど、非常に大きな加速度が記録された。地表における大加速度と高周波卓越の原因は、地盤への大加速度の入力と、非線形効果による増幅係数低下の度合いが低かったことによる。この傾向は上下動において特に顕著であった。上下動の加速度記録には、これまで知られていなかった上下非対称性が見られ、このような挙動を説明する物理モデルとしてトランポリンモデルが提示されるきっかけとなった。

また、単に加速度が大きだけでなく、大きな永久変位を伴うなど、断層近傍における地震動の特徴も見られた。海溝型巨大地震とは異なり、M7 前後の内陸地震では震度 6 以上の大きな地震動に見舞われる地域はせいぜい数十キロ程度とそれほど広くないため、大きな被害が生じるのは結果として断層近傍地域となる。従って、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動波形データは、大地震の発生が稀である上に対象地域が狭いことから、収録の機会はきわめて低い。1995年に発生した阪神淡路大震災（兵庫県南部地震）以降、日本においては、K-NET、KiK-net、自治体震度情報ネットワークなどが全国規模で整備されたため、徐々に断層近傍のデータが蓄積されつつある。地道ではあるが、今後も着実な強震観測の継続が重要である。

謝辞

気象庁、大阪ガス、JR、新潟県自治体震度計データを使用させていただきました。各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kinoshita, S. (1998): Kyoshin net (K-NET). Seism. Res. Lett., 69, 309-332.
- 2) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K., and Okada, Y. (2000): New strong-motion observation network: KiK-net. EOS Trans. AGU 81(48), Fall Meet. Suppl., Abstract S71A-05.
- 3) Suzuki, W., Aoi, S., and Sekiguchi, H. (2010): Rupture Process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Derived from Near-Source Strong-Motion Records. Bull. Seismol. Soc. Am., 100, 256-266.
- 4) 司宏俊・翠川三郎 (1999): 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式. 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- 5) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H. (2008): Trampoline effect in extreme ground motion. Science, 322, 727-730.
- 6) Idriss, I. M. and Seed, H. B. (1968): An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., 58, 2013-2032.
- 7) 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター (2008): 断層直上の GPS 観測点 (一関市・祭時) における地震時変動. http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/info/topics/20080614_news/GPS.
- 8) 伯野元彦 (2003): 世界最高 2,005 ガルでも無被害. 地震ジャーナル, 36, 50-51.
- 9) 川瀬博 (1998): 断層近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能. 第 10 回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, 29-34.

(原稿受理: 2009年9月18日)

要 旨

2008年6月14日8時43分に発生した2008年岩手・宮城内陸地震では、岩手県奥州市や宮城県栗原市で震度6強を記録し、死者17名、全半壊家屋176棟（消防庁、2009/7/2 現在）にのぼる被害が発生した。この地震に伴い、防災科研が全国に展開するK-NETおよびKiK-netではそれぞれ330点、325点の合計655観測点で記録が得られ、断層極近傍の数観測点を除いては司・翠川(1999)による距離減衰式と概ね調和的であり、全体としては平均的な地震動であった。逆断層上盤側のほぼ断層中央部に位置するKiK-net 関西観測点(IWTH25)では、地表観測点で三成分合成で4,022galという非常に大きな加速度を記録した。この記録は、水平二成分合成で1,434galであるのに対し、上下動成分が3,866galと、上下動が水平動に比べ二倍以上大きいという特徴を有する。また、上下動の波形状は明らかに上向きに大きく、下向きの2倍以上あり、一見きわめて奇妙な波形である。本稿では、岩手・宮城内陸地震の断層直上で記録された大加速度波形を中心に、地震動の特徴を報告する。

キーワード：2008年岩手・宮城内陸地震，トランボリン効果，4g，非対称地震動，KiK-net