

2009年8月11日駿河湾地震における強震動の特性

太田良巳¹⁾・藍檀オメル²⁾

The Characteristics of Strong Ground Motions Induced by The August 11, 2009 Suruga Bay Earthquake

Yoshimi Ohta¹⁾ and Ömer Aydan²⁾

Abstract

The 2009 Suruga Bay earthquake caused very high ground motions and strong motions had very strong directivity effects. In this paper, the authors evaluated the characteristics of strong motions around the Suruga Bay such as attenuation of maximum ground acceleration and velocity, spectral accelerations, amplification and permanent ground deformations. The attenuation of ground motions is close to those of the interplate earthquake rather than intra-plate earthquakes. The amplification of ground motions are strongly influenced by topography in addition to geotechnical conditions of ground. The surface deformations of ground may be quite different from those of the bedrock due to plastic deformations induced by ground shaking. Therefore, the co-seismic deformation measured by GPS near the epicentral area may not be directly associated with actual crustal deformations.

緒 言

2009年8月11日午前5時7分ごろ、静岡県御前崎の北東35 km 沖の駿河湾を震源とした気象庁マグニチュード6.5の地震が発生した。この地震は気象庁による正式な命名はされていないが、筆者らは地震発生直後から迅速な調査を行うにあたり駿河湾地震と通称して活動を行った。この地震により駿河湾を中心とし

て静岡県の多くの市町村で強い揺れが計測された。特に伊豆市、焼津市、牧之原市、御前崎市では最大計測震度6弱を観測している。今回の地震における被害の特徴として液状化、自然斜面および盛土の崩壊、墓石の移動(転倒・すべり・回転)、家屋の屋根の被害などがあげられる(Aydan *et al.*, 2010; 土木学会地震工学委員会, 2009)。本論文では、駿河湾地震による強震動特性に注目して、その特徴について述べる。

1) 東海大学大学院総合理工学研究科 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1 (現在 独立行政法人 原子力安全基盤機構) Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan (Present status: Incorporated Administrative Agency Japan Nuclear Energy Safety Organization, 4-1-28 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001, Japan)

2) 東海大学海洋研究所 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1

Institute of Oceanic Research and Development Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan
(2011年12月22日受付 / 2012年2月6日受理)

地震の特性

気象庁(2009)による本震の震源要素は以下の通りである。

発生時刻：2009年8月11日5時7分

震 央：北緯34度47.2分，東経138度29.9分

震源深さ：23 km

規 模：M 6.5

また，国土地理院(2009)により公表されている断層パラメータは以下の通りである。

走向角度：309°

傾斜角度：38°

幅 : 5.6 km

長 さ：16.7 km

すべり角：122°

すべり量：0.77 m

モーメントマグニチュード：Mw 6.2

発生機構は横ずれ成分を持つ逆断層型である。駿河湾地震はM 6.5であった。東海地域で発生が危惧されている東海地震において想定されているマグニチュードは8.0であり地震規模は小さい。地震エネルギーで比較すると東海地震で想定されているものに対して約1/200となっている。想定されている東海地震はプレート境界で発生する地震である。駿河湾地震はスラブ内の地震であり想定されている東海地震とは異なる。

Fig. 1に静岡県における主なM 5以上の被害地震の分布を示す。静岡県における主な地震活動は駿河トラフ・相模トラフ・南海トラフ沿いで発生するプレート境界の地震と陸域の浅い地震がある。

静岡市付近では1589年(M6.7)，1841年(M6.1/4)，1857年(M6.1/4)，1917年(M6.3)，1935年(静岡地震M6.4)，1965年(M6.1)とM6クラスの地震が発生している。これらの地震は今回の駿河湾地震と同じく震源の深さ20～30 kmのスラブ内で発生している。

地震動の特性

駿河湾地震では(独)防災科学技術研究所の強震ネットワークK-NET(防災科学技術研究所，2009)，基盤強震観測網KiK-net(防災科学技術研究所，2009)，気象庁強震ネットワーク(気象庁，2009)，(独)港湾空港技術研究所の港湾地域強震観測ネットワーク(国土交通省港湾局，2009)などの多くの強震観測

網により強震記録が計測されている。K-NETの観測点・焼津(SZO16)において水平最大加速度314 gal，KiK-netの観測点・西伊豆西(SZOH39)において水平最大加速度519 gal，静岡市にある観測点・静岡南(SZOH33)においても水平加速度432 galを観測している。気象庁強震ネットワークにおいては観測点・御前崎で最大水平加速度608 gal，港湾地域強震観測ネットワークでは観測点・御前崎において最大水平加速度501 galが計測されている。このように，各加速度観測網において最大加速度が計測された地点は大きく異なっている。

駿河湾地震により静岡県御前崎市・焼津市・牧之原市・伊豆市において震度6弱の最高震度が記録されたほか，東京都23区においても震度4が記録されるなど北は宮城県・山形県，南は島根県・広島県にわたる広域的に影響がでた。Fig. 2に気象庁発表の震度分布図を示す。

Fig. 3からFig. 6に筆者らの提案した距離減衰式(Aydan and Ohta, 2011a; アイダン・太田，2006)を用いて計算した震央距離と地表面最大加速度減衰の関係，最大加速度コンター図，震央距離と地表面最大速度減衰の関係，最大速度コンター図を示す。

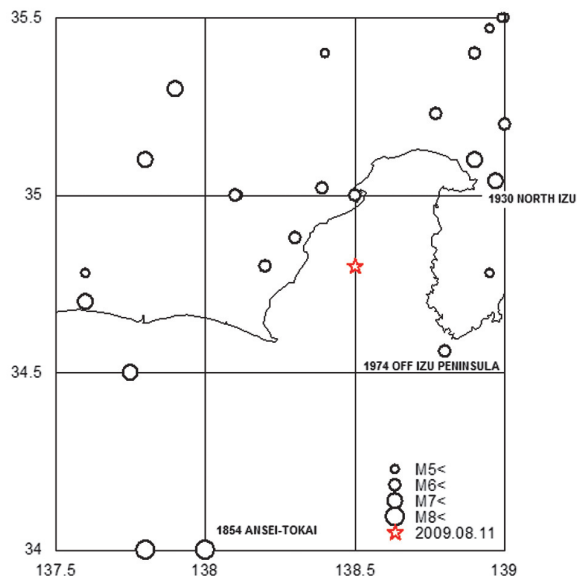


Fig. 1 Epicenters of earthquakes in Shizuoka Prefecture (M > 5).

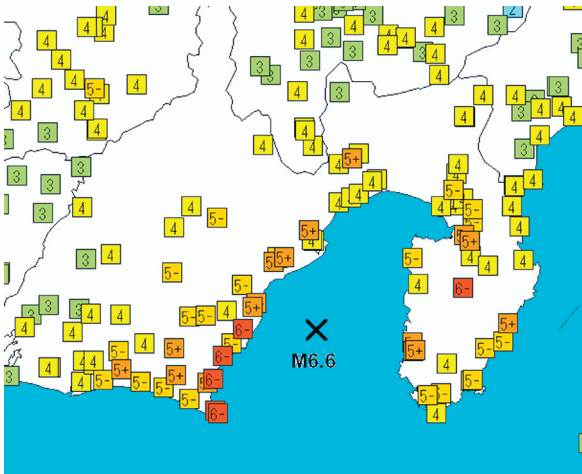


Fig. 2 Intensity distribution (from JMA).

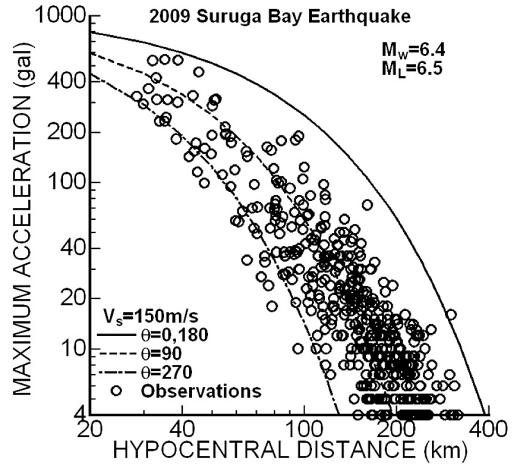


Fig. 3 Attenuation of maximum ground acceleration with distance.

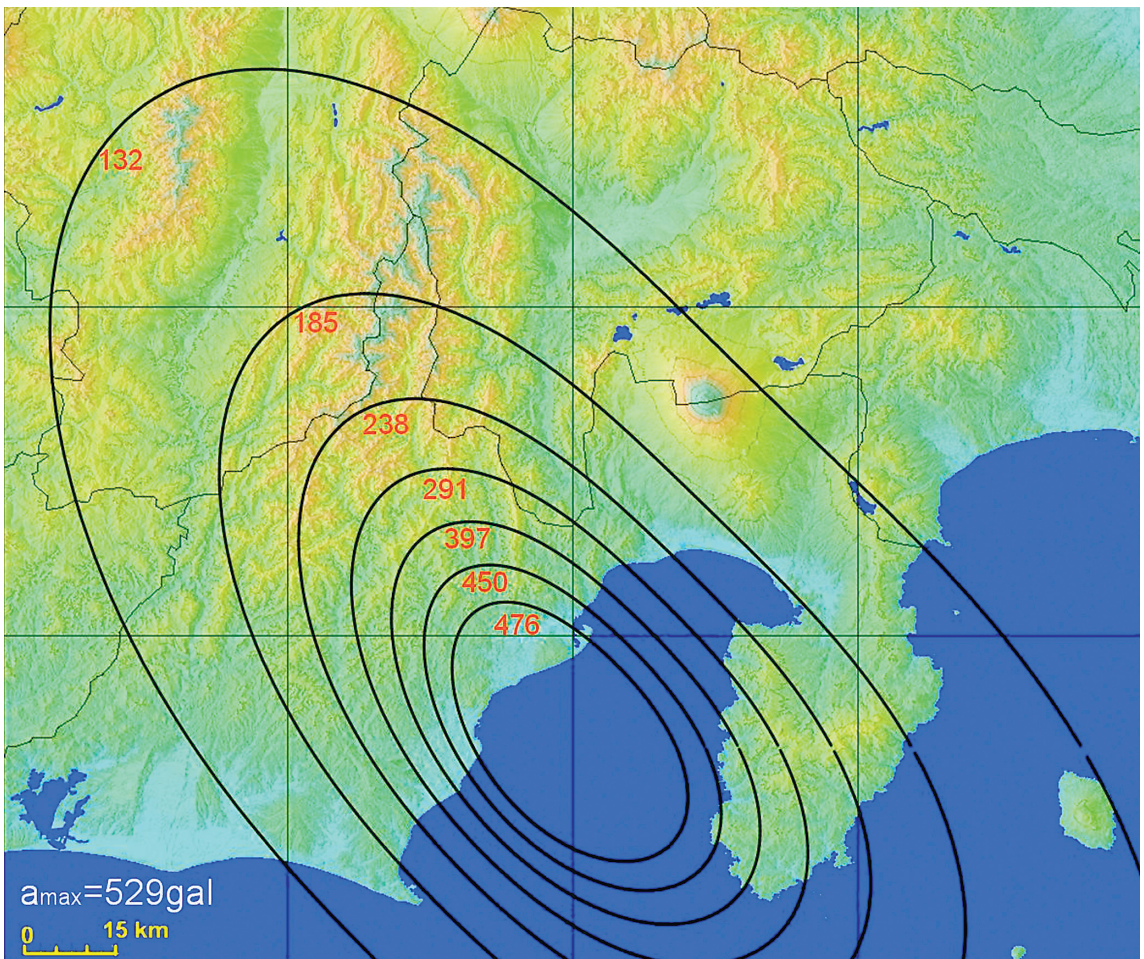


Fig. 4 Estimated contours of maximum ground acceleration.

県内各地の強震記録

2009年8月11日 駿河湾地震における主な地震被害としては、液状化・家屋の被害・墓石の移動(すべり、回転、転倒)・自然斜面、盛土、擁壁等の崩壊などがあげられる (Aydan *et al.*, 2010; 太田・藍檀, 2011). 以下に、静岡県における各地域の特徴的な地震動について紹介する。

御前崎市～牧之原市

御前崎市から牧之原市までの地域における被害の特徴は液状化と墓石の移動、家屋の屋根部の被害、東名高速道路の盛土の崩壊があげられる (Fig. 7).

Fig. 8 に港湾地域強震観測による御前崎港の基盤に

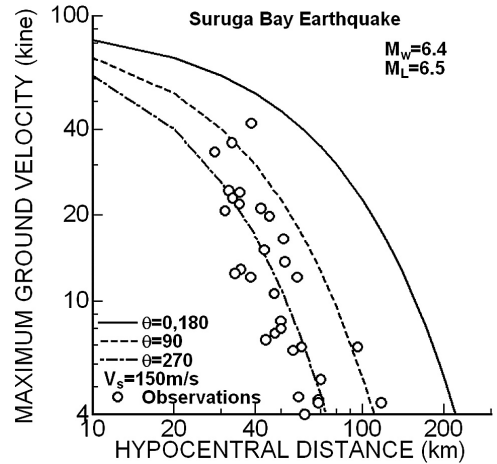


Fig. 5 Attenuation of maximum ground velocity with distance.

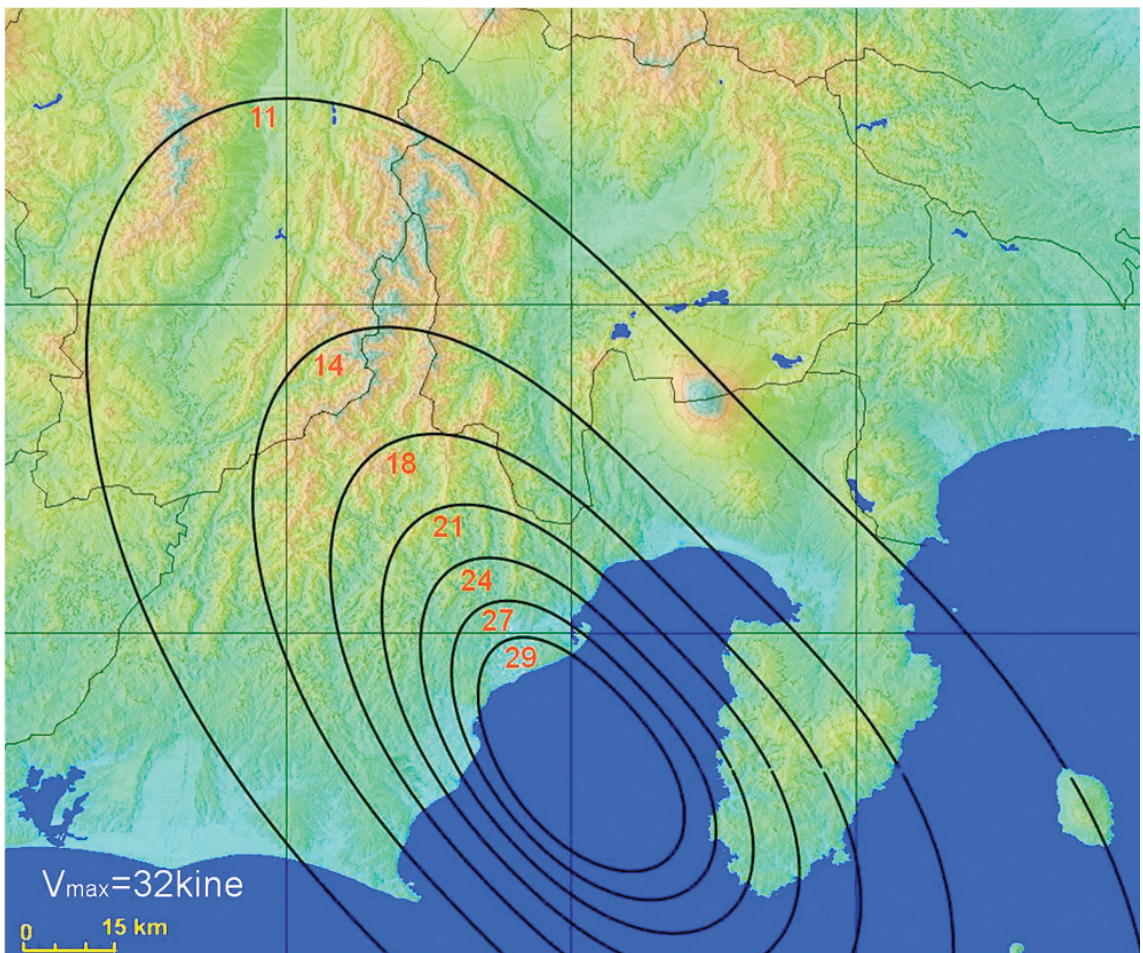


Fig. 6 Estimated contours of maximum ground velocity.

設置された加速度応答を示す。地盤高-10 mの基盤面において計測された加速度応答は南北方向で最大で約350 galが計測された。また、同じ御前崎港において、地盤高-2 mに位置する加速度計では南北方向で最大で約500 galが計測されている。御前崎港の地表面においては、南北方向において非常に大きな増幅が見られた。一方、東西方向および上下方向においては、大きな増幅は見られていない。

Fig. 9に御前崎市から牧之原市に設置された各観測機関で計測された加速度応答より作成したオービットを示す。この図より、気象庁の御前崎での地震動は南北方向が卓越していることがわかる。この傾向は港湾地域強震観測ネットワークにおける強震記録においても同様であった。南北方向において最大で約600 gal、東西方向において最大で約400 galが計測されている。御前崎港の基盤における加速度応答に比べて、東西方向および南北方向の加速度応答は大きく増幅している。一方、上下方向においては大きな増幅は見られない。気象庁の加速度記録が設置されている場所は、気象庁の御前崎測候所建物内に位置している。御前崎測候所は港湾地域強震観測の加速度計の位置している御前崎港から40 m程の細長い高台に位置している。気象庁の加速度応答は地形の影響を大きく受けているものと考えられる。気象庁御前崎の近くに設置されている御前崎市白羽で計測された加速度応答によるオービットは東西方向が卓越している。一方、牧之原市鬼女新田で計測された加速度応答は付近の御前崎や牧之

原市相良庁舎で計測された加速度応答と大きく異なり非常に小さい応答であった。この加速度計は岩盤に設置されていると考えられる。牧之原市相良庁舎で計測された加速度応答は南西方向に卓越していることが見て取れる。

Fig. 10にK-NETにおける榛原の加速度記録より求めた加速度応答スペクトルを示す。周期0.5秒あたりに強いピークが見られる。

焼津市～静岡市

焼津市から静岡市にかけての各観測機関における観測結果の特徴について述べる。

Fig. 11にK-NET焼津における加速度応答から求めた加速度応答スペクトルを示す。東西方向および南北方向において、3つのピークが見て取れる。東西方向および南北方向に共通して周期0.6 sと周期0.4 s付近にピークがあり、東西方向では周期0.1 s付近、南北方向では周期0.2 s付近にピークが確認できる。

KiK-net観測網における静岡南(SZOH-33)の観測結果である。静岡南の地表面における3成分合成加速度544.9 galは今回の地震におけるKiK-net観測網の中で最大の加速度応答を計測した。Fig. 12にKiK-net静岡南における基盤面の加速度応答を、Fig. 13にKiK-net静岡南における地表面の加速度応答をそれぞれ示す。基盤面の加速度応答に比べて地表面の加速度応答は非常に大きな増幅が見られる。KiK-net静岡南の震央距離は約29 kmである。一方、震央距



Fig. 7 Views of some damage caused by the Suruga Bay earthquake.

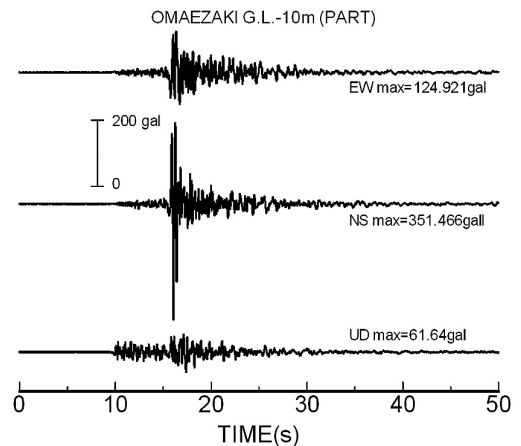


Fig. 8 Acceleration records at Omaezaki Port.

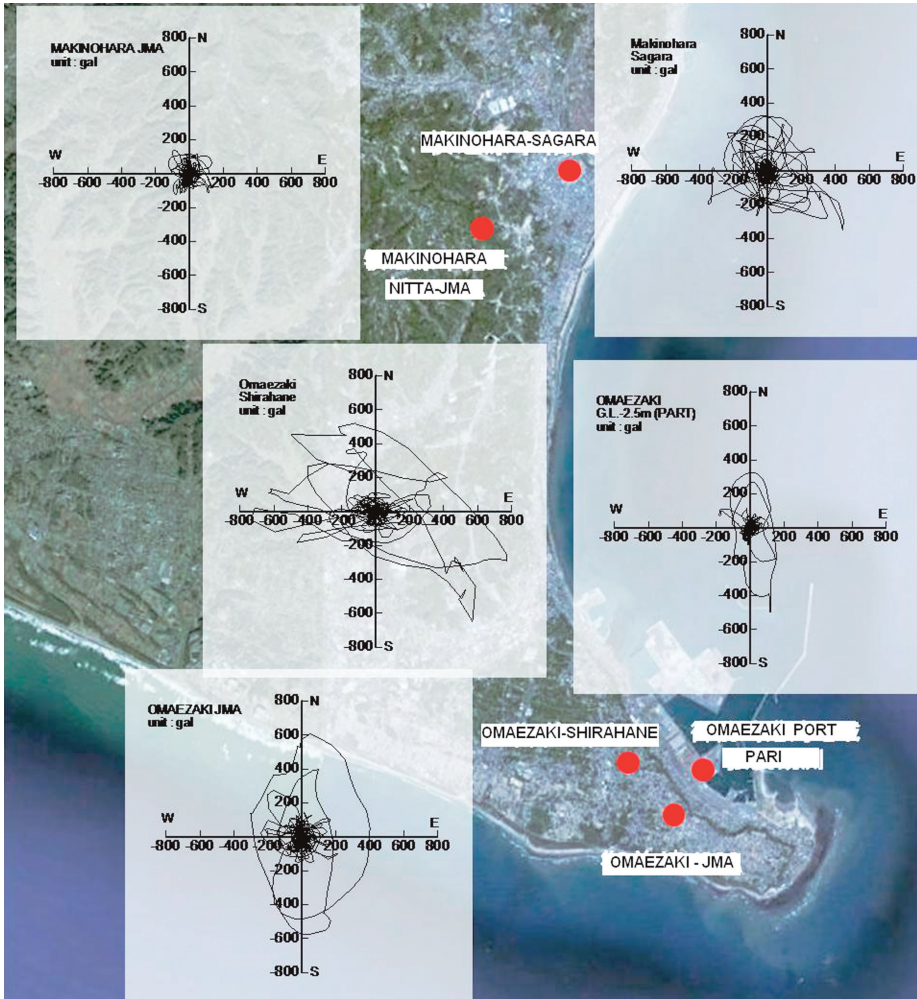


Fig. 9 Orbits of ground acceleration from Omaezaki to Makinohara.

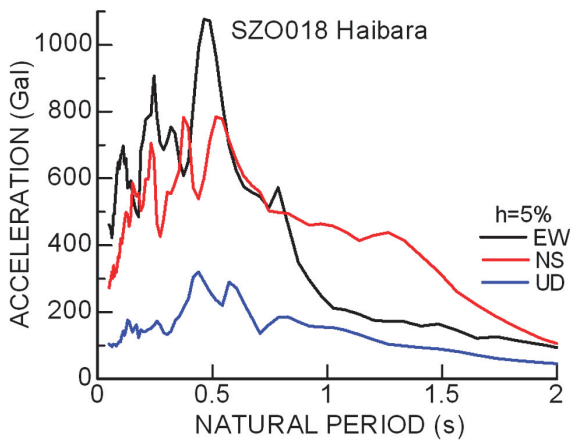


Fig. 10 Acceleration spectra of K-NET Haibara Station.

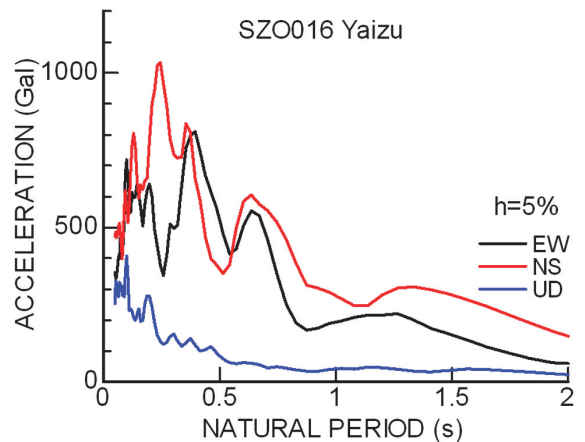


Fig. 11 Acceleration spectra of K-NET Yaizu Station.

離が KiK-net 静岡南より短い約 23 km の位置にある K-NET 静岡では 3 成分合成加速度 364.3 gal である。KiK-net 静岡南の地表面において計測された大きな加速度は地形の影響が大きく作用しているものと考えられる。KiK-net 静岡南の背面には河川が流れており、河川から 5 m 程度の高台に位置している。また、周辺の地質は安倍川の周辺で沖積低地であり、広い平野から土地が狭くなりながら谷になっていく様な地

形の入り口にあるため、加速度応答が大きく増幅したものと考えられる。Fig. 14 に KiK-net 静岡南における加速度応答スペクトルと増幅スペクトルの関係を示す。加速度応答スペクトルで得られたピークと増幅スペクトルのピークは若干異なっている。

Fig. 15 に KiK-net 清水南における加速度応答から求めた加速度応答スペクトルを示す。周期 0.2 s 付近にピークが見られる。

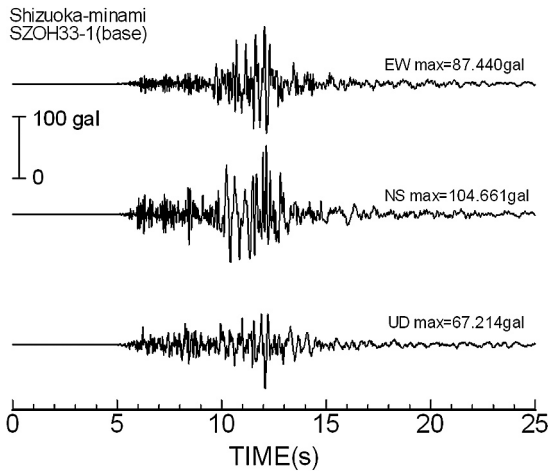


Fig. 12 Acceleration records of KiK-net Shizuoka Minami Station (base).

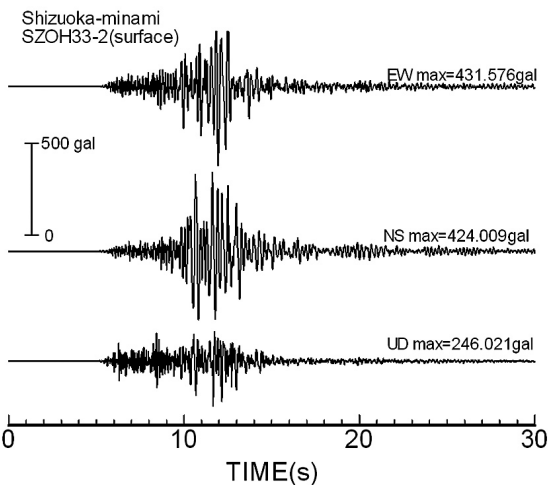


Fig. 13 Acceleration records of KiK-net Shizuoka Minami Station (surface).

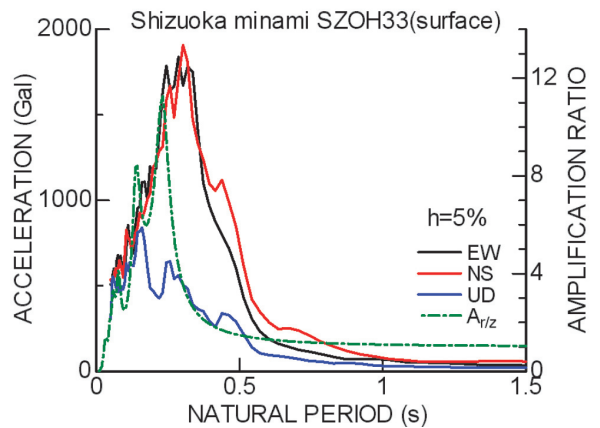


Fig. 14 Acceleration spectra of KiK-net Shizuoka Minami Station and its amplification.

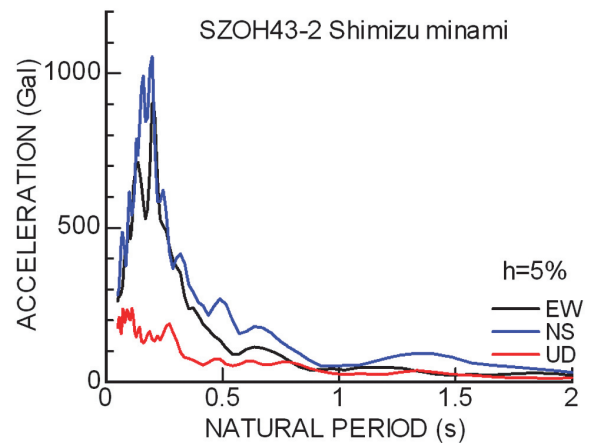


Fig. 15 Acceleration spectra of KiK-net Shimizu Minami Station.

伊豆地方

伊豆地方における強震動の特徴は局所的に大きな加速度応答が計測されたことである。伊豆地方の代表的な加速度応答としてKiK-net 西伊豆西(SZOH39) および KiK-net 修善寺(SZOH42)について紹介する。

Fig. 16 から Fig. 19 に KiK-net 西伊豆西の加速度計設置状況、基盤面における加速度応答、地表面の加速度応答、地表面の加速度応答から求めた加速度応答スペクトルと増幅スペクトルの関係をそれぞれ示す。Fig. 16 に示すように、加速度計は深さ 10 m ほどの谷を埋めた台地に設置されている。Fig. 17 および Fig.

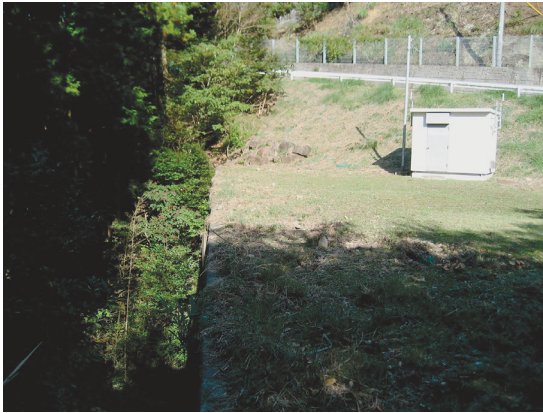


Fig. 16 A view of Nishi Izu Station.

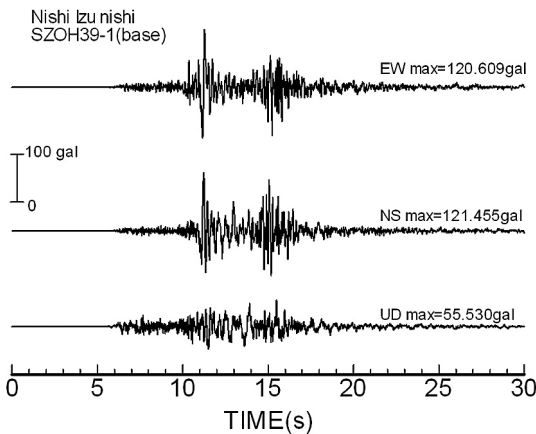


Fig. 17 Acceleration records of KiK-net Nishi Nishi Izu Station (base).

18 より基盤面の加速度応答に比べて地表面の加速度応答は大きく増幅しているのが見てとれる。また、Fig. 19 に示す加速度応答スペクトルでは周期 0.2 s および周期 0.4 s 付近にピークが見られる。増幅スペクトルのピークと加速度応答スペクトルのピークは若干異なっている。KiK-net 西伊豆西において非常に大きな加速度応答が計測された要因として、地形的な影響が大きく関係していると考えられる。

Fig. 20 から Fig. 23 に KiK-net 修善寺の加速度計設置状況、基盤面における加速度応答、地表面の加速度応答、地表面の加速度応答から求めた加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。Fig. 20 に示すように、加

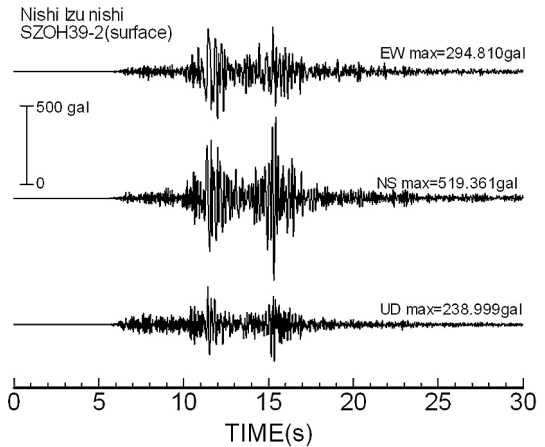


Fig. 18 Acceleration records of KiK-net Nishi Izu Nishi Station (surface).

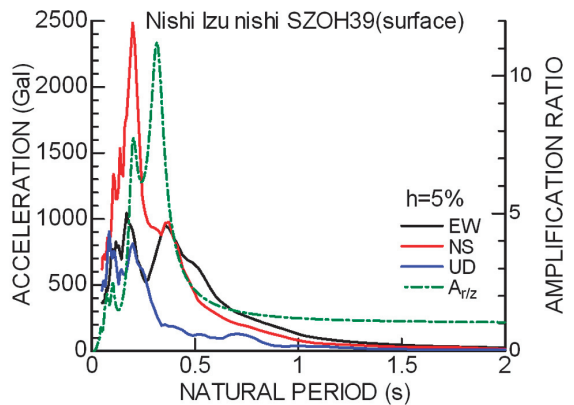


Fig. 19 Acceleration spectra of KiK-net Nishi Izu Nishi Station and its amplification.

速度計は東向き尾根の先端に設置されている。Fig. 21 および Fig. 22 より基盤面の加速度応答に比べて地表面の加速度応答は大きく増幅しているのが見てとれる。また、Fig. 23 に示した加速度応答スペクトルでは周期0.5 s 付近にピークが見られる。加速度応答スペクトルのピークと増幅スペクトルのピークは若干異なっている。KiK-net 修善寺においても非常に大きな加速度応答が計測された要因として、地形的な影響が大きく関係していると考えられる。伊豆半島は山地が多く、KiK-net 修善寺の加速度計の設置状況のような尾根が多く存在する。特に東向き尾根は後ろ側から地震動を受け、先端に向けて地震動が集中してい



Fig. 20 A view of Shuzenji Station.

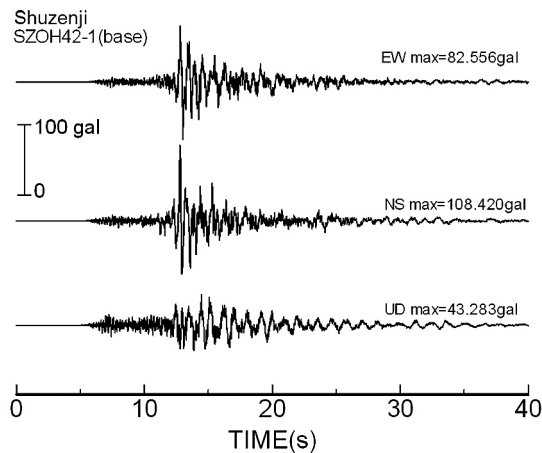


Fig. 21 Acceleration records of KiK-net Shuzenji Station (base).

るものと考えられる。伊豆半島に見られた多くの被害はこういった尾根に集中している。伊豆市の東向寺や修善寺における墓石の被害は同じ墓地内であっても東向き尾根に集中し、普通の斜面ではそれほど被害の報告がされていない(土木学会地震工学委員会, 2009; 飛鳥建設技術研究所, 2009)。

Fig. 24 に伊豆半島で計測された加速度応答より作成したオービットを示す。K-NET 沼津と KiK-net 南伊豆に比べて KiK-net 西伊豆西と KiK-net 修善寺は大きく加速度が増幅しているのが見てわかる。

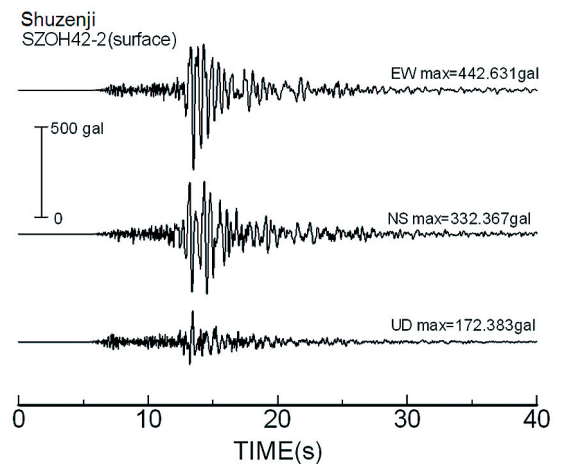


Fig. 22 Acceleration records of KiK-net Shuzenji Station (surface).

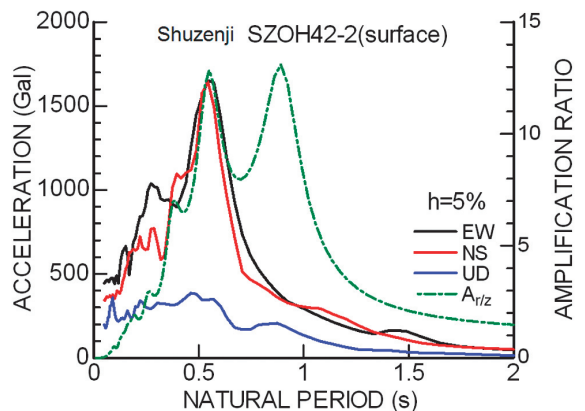


Fig. 23 Acceleration spectra of KiK-net Shuzenji Station and its amplification.

駿河湾地震における永久変形

一般的に加速度応答を2階積分すると変位応答を求めることができる。しかしながら、実際加速度応答を積分すると積分定数の影響により得られる変位応答は発散してしまう。加速度応答から数値積分法を用いて変位応答を導くには、ベースラインの修正が必要である。そこで、筆者らがベースラインを修正する手法として提案しているEPS法(太田・藍檀, 2007; Aydan and Ohta, 2011b)を用いて加速度応答を積分し変位応答を求めた。

Fig. 25にEPS法を用いた計算結果の一例として、KiK-net清水南の基盤面の加速度応答を用いた計算結果を示す。計算結果より西に0.51 cm, 南に1.29 cm, 2成分合成1.39 cmという結果を得た。加速度計の地殻のGPS結果は南西方向に0.8 cmである。EPS法を用いた計算結果の妥当性を示すことができた。

Fig. 26に国土地理院(2009)が公表した水平変動ベクトル図を示す。また、Fig. 27にKiK-netの基盤面の加速度応答を用いた計算結果を、Fig. 28にKiK-netおよびK-NETの地表面の加速度応答を用いた計算結果をそれぞれ示す。基盤面の水平変動ベクトル図はFig. 26に示す水平変動ベクトル図と同じ傾向が見取れる。一方、地表面の水平変動ベクトル図は基盤面の変位と異なる応答を示している。

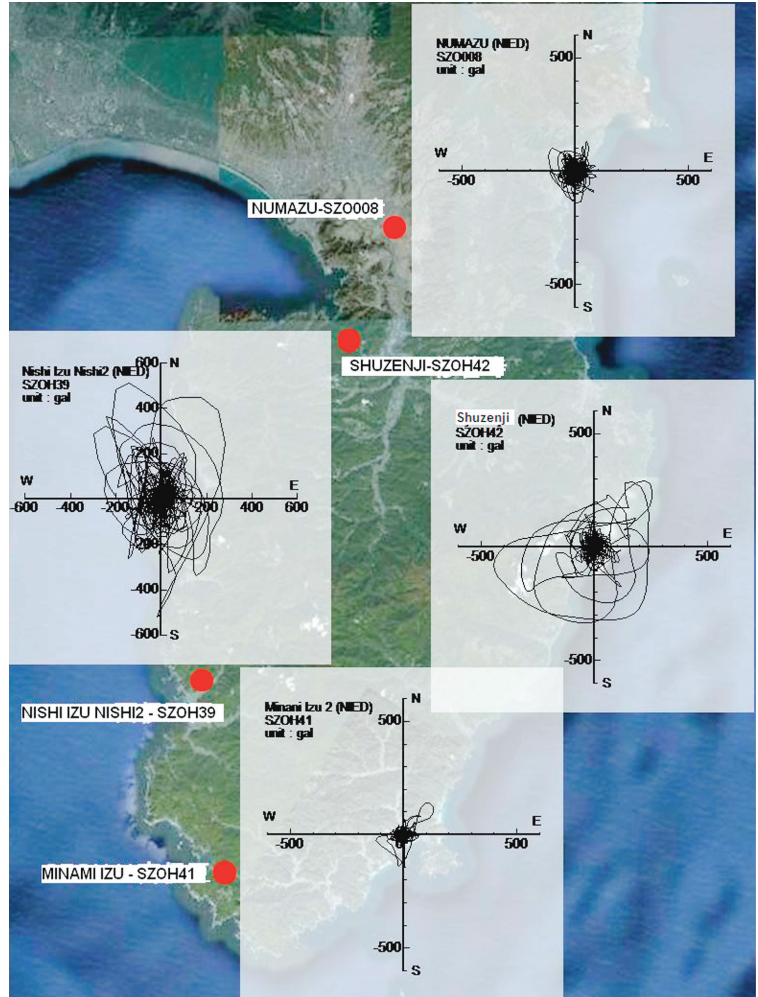


Fig. 24 Orbits of acceleration at Izu Peninsula.

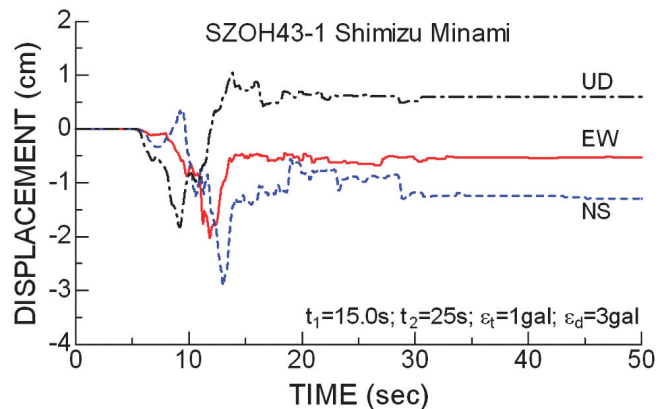


Fig. 25 Displacement responses of the base of KiK-net Shimizu Minami station computed from EPS method.

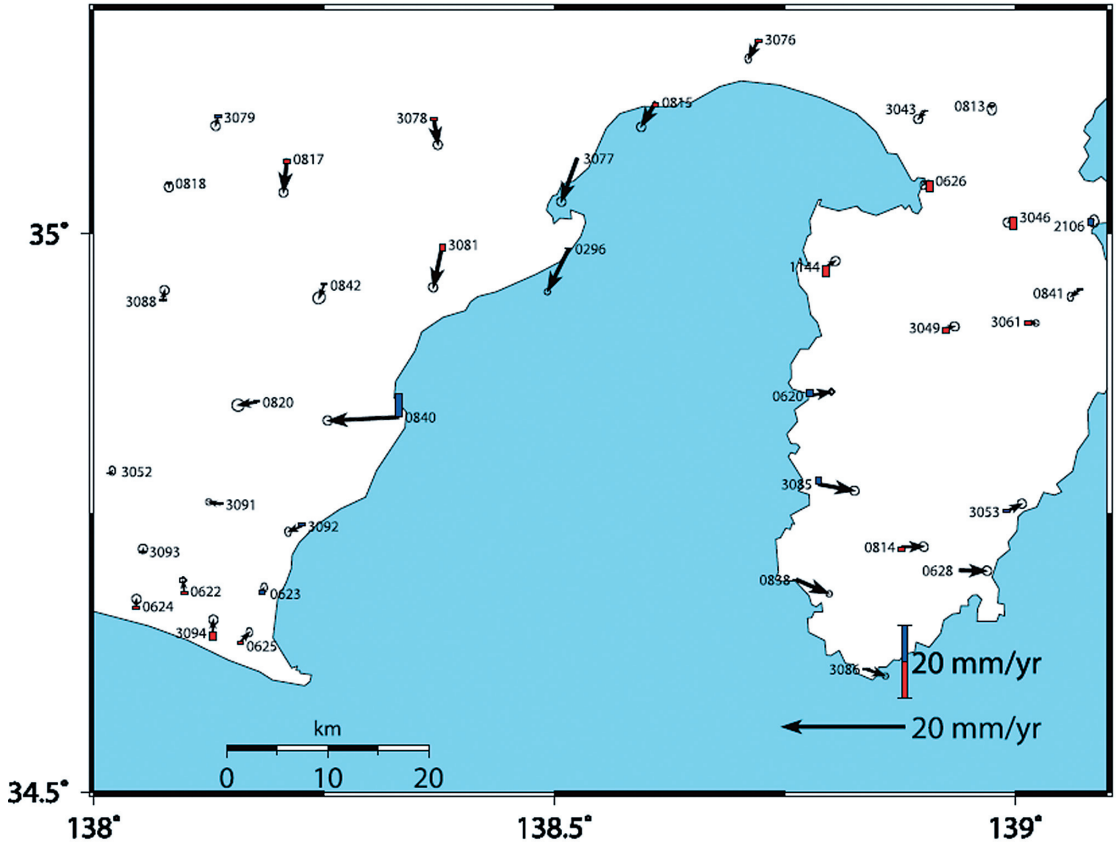


Fig.26 Horizontal displacement vectors (from GSI) .

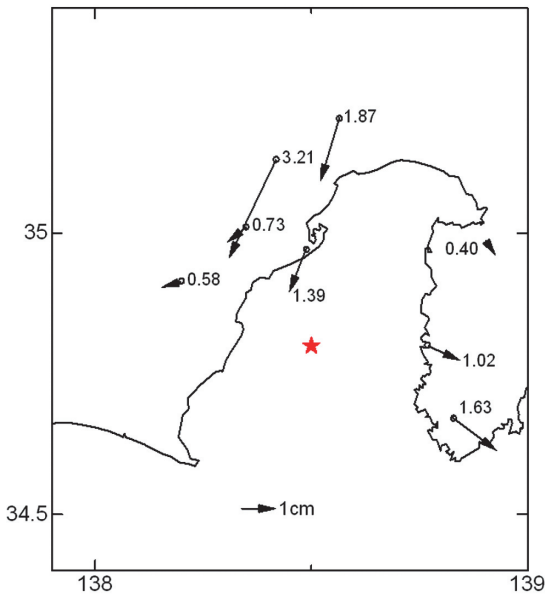


Fig.27 Horizontal displacement vectors computed from EPS method (base) .

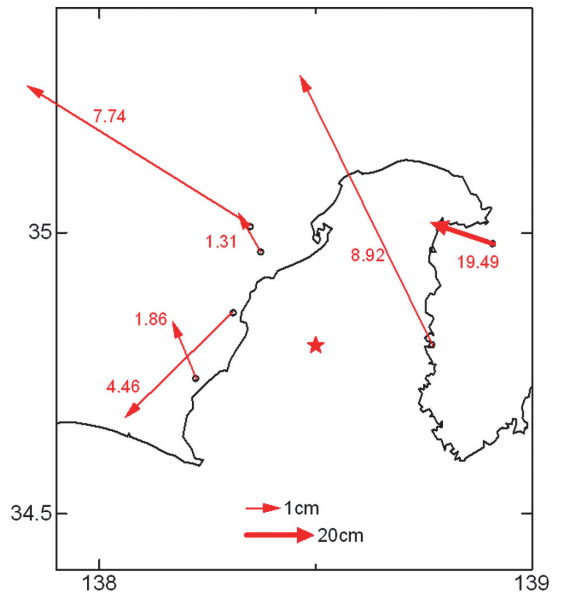


Fig.28 Horizontal displacement vectors computed from EPS method (surface) .

ま と め

2009年8月11日に発生した駿河湾地震において計測された強震記録について以下のことが分かった。

駿河湾地震の大きな特徴として、想定される断層の下盤側に位置する、御前崎市や牧之原市および震源から遠く離れた伊豆市において最大震度6弱が計測された。また、各機関の強震観測網により計測された最大加速度応答は、それぞれの観測網でそれぞれ計測された地点が異なっている。これは、地形的あるいは地質的な影響が非常に作用している。

EPS法を用いて加速度応答を2階積分し求めた、基盤面の変位応答はGPS計測より求められた水平変動ベクトル図と非常に類似した結果を得ることができた。しかしながら、地表面の加速度応答を用いた計算結果は地表の地形的および地質的な影響があり、水平変動ベクトル図は基盤面と地表面で異なる変位応答を示している。

謝 辞

本研究を行うにあたり、強震ネットワークK-NET, KiK-net, 気象庁強震ネットワーク, 港湾地域強震観測のデータを利用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

アイダン・オメル, 太田良巳 (2006): 地震断層近傍における地震同の特徴とその評価。「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題(II)」シンポジウム, 東京, 土木学会, 114-120.

Aydan, Ö., S. Miwa and Y. Ohta, (2010): Reconnaissance report on the Suruga Bay earthquake of August 11, 2009. Japan Society of Civil Engineers, Earthquake Engineering Committee, Earthquake Disaster Investigation Committee, 60pp., http://www.jsce.or.jp/library/eq_repo/Vol3/11/20090811report.pdf.

Aydan, Ö. and Y. Ohta (2011a): A new proposal for strong ground motion estimations with the consideration of characteristics of earthquake fault. Seventh National Conference on Earthquake Engineering, 30 May – 3 June 2011, Istanbul, Turkey, Paper No : 65.

Aydan, Ö. and Y. Ohta (2011b): The erratic pattern screening (EPS) method for estimation of co-seismic deformation of ground from acceleration records and its applications. Seventh National Conference on Earthquake Engineering, 30 May – 3 June 2011, Istanbul, Turkey, Paper No: 66.

土木学会地震工学委員会-JSCE-EEC (2009): 被害地震報告. <http://www.jsce.or.jp/>.

気象庁(2009): 平成21年8月11日の駿河湾の地震. http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2009_08_11_suruga-wan/.

防災科学技術研究所 (2009): 基盤強震観測網 KiK-net. <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>.

防災科学技術研究所 (2009): 強震ネットワーク K-NET. <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.

国土地理院 (2009): 駿河湾を震源とする地震関連. <http://www.gsi.go.jp/kohokocho/h21-8-11-sizuoka.html>.

太田良巳, アイダン・オメル (2007): 加速度から変位を求める積分手法と実地震への適用, 「海-自然」東海大学紀要海洋学部, 5, 1-12.

太田良巳, 藍檀オメル (2011): 2009年8月11日駿河湾地震による地盤の液状化とそれに伴う被害について, 「海-自然」東海大学紀要海洋学部, 9, 1-9.

国土交通省港湾局 (2009): 港湾地域強震観測. <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>.

飛鳥建設技術研究所 (2009): 平成21年(2009年)8月11日の駿河湾地震地震被害調査速報. <http://www.tobi-tech.com/index.htm>.