

## 柏崎中心市街地における表層地盤と地震動の増幅

田村 良一\*, 岩野 武尊\*\*

(令和 2 年 11 月 30 日受理)

## Amplification of Earthquake Motion in Surface Layer at Central City in Kashiwazaki

Ryoichi TAMURA\* and Takeru IWANO\*\*

The central city in Kashiwazaki suffered severe building damage by the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake. This study has examined amplification of seismic motion in surface layer at this area. Strong ground motion with a large periodic component of 2-3s were recorded at K-net Kashiwazaki located in the central city during main shock of the Chuetsu-oki Earthquake. Seismic amplification factor of the surface layer were examined by using the records of K-net Kashiwazaki and the estimated bedrock outcrop seismic motions at the Service Hall of Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant. For relatively weak seismic motion, a period of about 1.1-1.6s is amplified, which is consistent with the amplified period estimated by microtremor. Amplified periodic component by the Chuetsu-oki Earthquake are about 1.4-1.6s for largest aftershock and about 2-3s for main shock. The amplified periodic component become longer by increase of nonlinear behavior of subsurface soils with increasing amplitude of seismic motion. It is revealed that estimated bedrock outcrop seismic motion of mainshock of the Chuetsu-oki Earthquake is one with a relatively large periodic component of 2-3s. This is one reason why the strong ground motion as described above occurred at K-net Kashiwazaki.

Key words: Surface layer , Amplification , Seismic motion , Chuetsu-oki earthquake

## 1. はじめに

新潟県中越沖地震は 2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分頃に新潟県中越沖を震源として発生したマグニチュード 6.8 の地震であり、震源に近い柏崎市、刈羽村等では震度 6 強を観測した。この地震により柏崎市では、建物倒壊の下敷きになるなどによる人的被害を受ける一方、建築、土木構造物においても多くの被害を受けた。このような中、建築物の被害に着目すると、古くからの市街地であった柏崎市中心部に集中する傾向が見られた<sup>[1]</sup>。この中心市街地の表層地盤には、砂丘層の下に厚い沖積層を見ることができる。本論では、この表層地盤の地震動増幅について検討する。ここで中心市街地としているのは、文献<sup>[1]</sup>で、日本建築学会が被災建物の悉皆調査を行った地域 (Fig.3) を主な対象とする。

\* 工学科(建築・都市環境学系)教授

Professor, Division of Architecture and Urban Environment, Department of Engineering

\*\* 村尾技研(元新潟工科大学工学研究科 博士前期課程)

MURAO GIKEN Corporation

一般に、地表面で観測される地震動は、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性の影響を受けると言われている<sup>[2]</sup>。サイト増幅特性と地震被害との関係は、例えば、2004年中越地震による小千谷の木造住宅被害において、時水・吉谷地区の被害率が中心市街地より極めて大きくなった原因として以下のように示されている。両地域とも微動などによる地盤卓越周期は0.4~0.5秒程度であったが、時水・吉谷地区では表層地盤の非線形化により、卓越周期が木造被害に影響の大きい1~2秒程度まで伸びたことが考えられる<sup>[6]</sup>。

本論では、中越沖地震で建物被害の大きかった中心市街地の地盤構成について述べ、常時微動から求めた地盤卓越周期(揺れやすい周期)について報告する。その後、中心市街地内のK-net 柏崎(NIG018, 地表面)で得られた観測地震動について示す。さらに、中心市街地と約8km離れた柏崎刈羽原子力発電所サービスホールでの、鉛直アレイ地震観測記録を用いて基盤露頭波を推定する。この基盤露頭波を広域的なものとして扱いK-net 柏崎(NIG018)での地震動と比較し、中心市街地における地震動の地盤増幅について検討する。

## 2. 中心市街地の表層地盤構成と常時微動観測による地盤卓越周期

### 2.1 中心市街地の表層地盤構成

中越沖地震で被害の大きかった中心市街地は、柏崎平野南西部の海岸近くに位置している。Fig.2に日本建築学会が被災建物の悉皆調査を行った地域(Fig.3)とその周辺の地質断面図<sup>[3]</sup>を示す。文献<sup>[3]</sup>のC-C'断面とB-B'断面の一部であるが、表示範囲はFig.1に示している。柏崎平野は安田層の上にN値が10未満の軟弱な沖積層である粘性土(Ac)が厚く堆積しており、内陸部で30~40m、海岸近くでは40~50mに達している。安田層は、更新世後期の約10万年前頃に形成された段丘堆積物であり、その後の氷期を通して浸食が進み、刻まれた深い谷に沖積層が形成されたものと考えられている<sup>[1]</sup>。

Fig.2の地質断面図において、本論で対象としている中心市街地は地表面から10m程度は新規砂丘に覆われているが、その下は粘性土を中心とした沖積層が40m程度続き、T層(新第三紀の西山層)に至っていることが分かる。

### 2.2 常時微動観測による地盤卓越周期

#### 2.2.1 微動から評価した地盤卓越周期

主に中心市街地を対象として常時微動観測から算出した地盤卓越周期(揺れやすい周期)について示す。観測点を移動しながら微動の単点観測を実施した。観測には、固有周期5秒の3成分速度計を用いた。サンプリング周波数は100Hzとし、10分間(600秒間)計測し、比較的安定している20秒間隔を10区間取り出し、10区間のH/Vスペクトルの平均を求め、平均スペクトルのピーク位置の周期から地盤卓越周期を算出した。各区間のH/Vスペクトルは(1)式を用いて作成した。分子の水平方向(H)は、NS, EW方向記録のフーリ

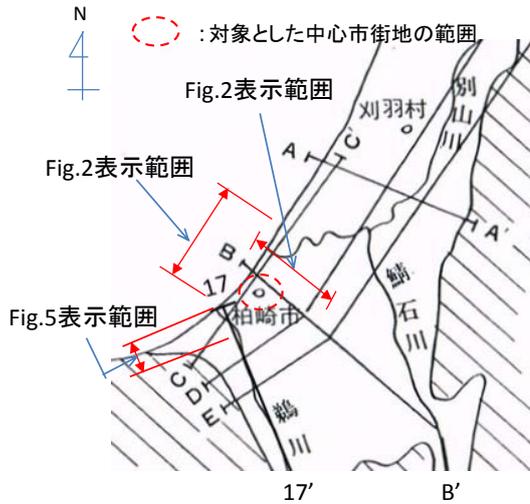
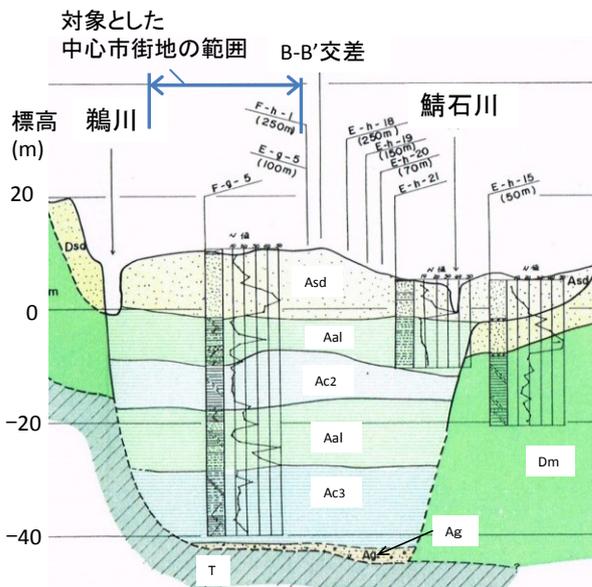


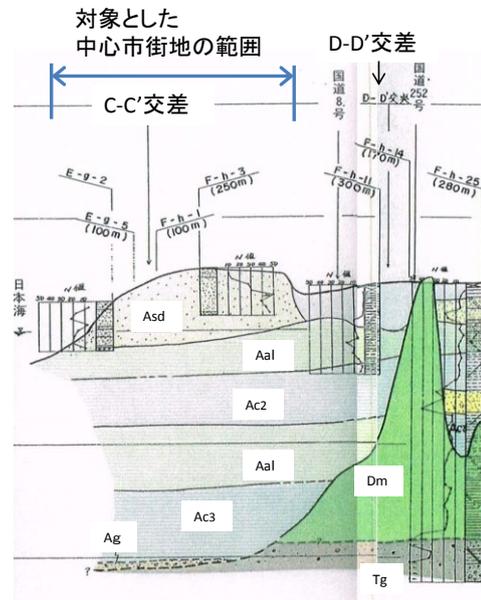
Fig.1 Layout of Soil Cross Section

Note

地質年代		記号	地層区分
		Asd	新期砂丘層
沖積世	沖積層	Aal	砂・粘性土互層(中部)
		Ac2	粘性土(中部)
		Ac3	粘性土(下部)
洪積世		Ag	砂礫(下部)
		Dm	砂・粘性土(安田層相当)
新第三紀		T	泥岩・砂岩・火砕岩



(1) A part of C-C'



(2) A part of B-B'

注) 破線の地層境界線は推定によるものと考えられる

Fig.2 A part of C-C', B-B' Cross Section<sup>[3]</sup>

エスペクトルの2乗和平方根, 分母の鉛直方向(V)はUD 方向のフーリエスペクトルである. H/V スペクトルは観測地点の振動特性を求めるために利用されている例え[7], [8].

$$H/V(f) = \frac{\sqrt{x(f)^2 + y(f)^2}}{|z(f)|} \quad (1)$$

ここで, x(f), y(f), z(f)はNS, EW, UD 方向のフーリエ振幅スペクトルであり, 0.2Hz のParzen Window を施し平滑化している.

各観測点で算出した中心市街地とその付近の地盤卓越周期<sup>[9]</sup>を Fig.3 に示す. H/V スペク

トルの例として、K-net 柏崎(NIG018), 17-1, 17-2 での結果を Fig.4 に示す. 3 地点の位置は Fig.3 に示すが、K-net 柏崎(NIG018)は悉皆調査地域内である. 17-1, 17-2 は悉皆調査地域の近傍で、Fig. 1 に示す 17-17' 地質断面線<sup>[4]</sup>上の 2 点であり、Fig.5 に示すような地盤調査結果(N 値)を図から得ることができる地点である. 平均 H/V スペクトルのピーク位置から求めた 3 地点の地盤卓越周期は Fig.4 中に示すように、K-net 柏崎(NIG018)で 1.3 秒、17-1 で 1.28 秒、17-2 で 1.4 秒である. Fig.3 から中心市街地の地盤卓越周期を見ると、周期 1 秒程度以上であることがわかる. 悉皆調査地域では、K-net 柏崎(NIG018)より西側で 1.25 ~1.5 秒程度、東側で 1~1.25 秒程度、北側では 1.5~2 秒となる地点も見られる.

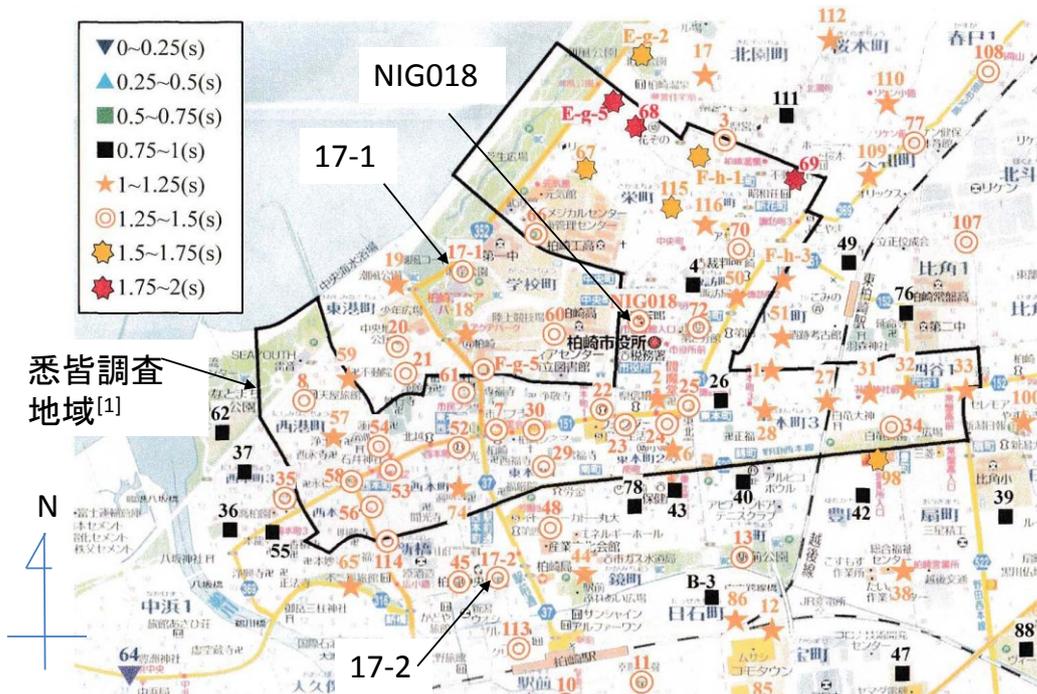


Fig.3 Distribution of Predominant Periods by Microtremor at Central City

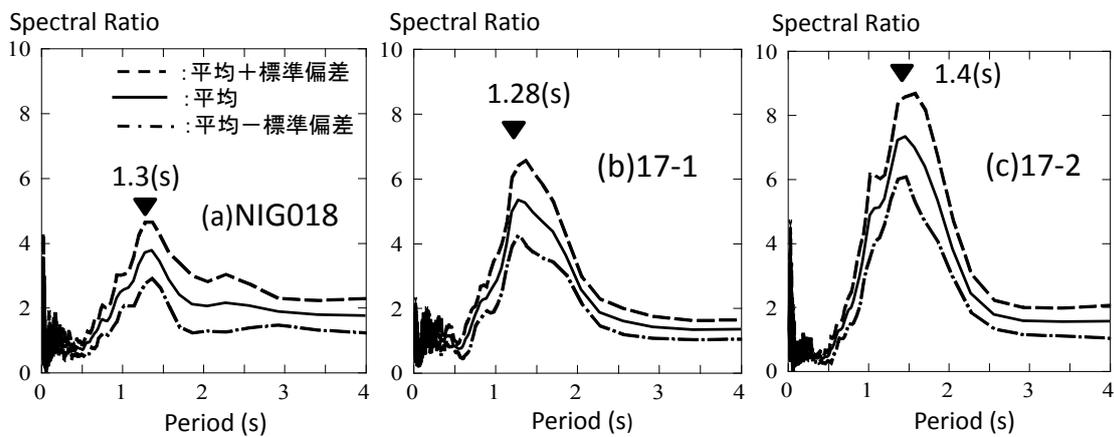


Fig.4 H/V Spectrum by Microtremor Record

## 2.2.2 基底面の推定

ここでは、2.2.1項でH/Vスペクトルを示した17-1, 17-2における標準貫入試験結果(N値, Fig.5)を用いて、2地点のS波の鉛直入射を仮定した4分の1波長則による地盤卓越周期を算出し、地盤卓越周期に対応する基底面を推定する。以下に、4分の1波長則による地盤卓越周期の算出手順を示す。

- ① 手法では、表層部分のみを対象とするので、基底面を仮定する。深さ方向にN値変化の大きい位置としてFig.5中に◀で示す位置を設定する。地表面からの深さは17-1で61.5m, 17-2で51mである。設定した基底面は浅は沖積層であり、以深はPm2(更新統, 安田層), T(新第三紀, 西山層)である。
- ② 深さ方向に水平成層地盤を仮定しFig.5から目視で読み取ったN値と地層区分から(2)式<sup>[10]</sup>より各深さ位置での換算S波速度( $V_{Si}$ )を算出する。iは水平成層地盤の層番号、(2)式のDは深さ、 $F_1, F_2$ は土質と地質年代による係数を示す。
- ③ 水平成層地盤とした表層地盤を等価な一つの層に置換するために、等価S波速度( $V_{SE}$ )を(3)式を用いて算出する。(3)式の $H_i$ は層の厚さを示す。
- ④ (4)式を用いて地盤卓越周期( $T_g$ )を計算する。

$$V_{Si} = 68.78 N^{0.171} D^{0.199} F_1 F_2 \quad (2)$$

$$V_{SE} = \frac{\sum H_i}{\sum (H_i/V_{Si})} \quad (3) \quad T_g = \frac{4 \sum H_i}{V_{SE}} \quad (4)$$

一般に、常時微動で観測されるのは表面波(レイリー波等)と考えられ、地震動は実体波(S波)が中心と考えられる。表層と基盤層の2層構造を考えた場合、両者のせん断波速度等のコントラストが大きいと、両者の卓越周期はほぼ等しくなる<sup>[7], [8]</sup>。今回のようなN値で大きな変化のある基底面では、コントラストが大きくなるので、微動の結果を用いて実体波による地盤卓越周期を近似できるものと考えられる。

4分の1波長則により算出された地盤卓越周期( $T_g$ )をTable1に示す。17-1で1.03秒, 17-2で1.28秒である。微動から算出されたそれぞれの値は1.28秒, 1.4秒であるので、幾分小さくなる傾向はみられるが、微動による結果との対応関係を見ることができ、設定した基底面の妥当性を確認できる。この幾分の相違には、4分の1波長則が簡便な概算検討に用いる方法であり多層を等価な一つの層に置換すること、N値を目視で読み取っていることによる誤差などが影響している可能性がある。以上から、地盤卓越周期に関する基底面は、沖積層とPm2又はTとの境界位置と推定される。また、基底面でコントラストが大きいことは、H/Vスペクトルの明確なピーク形状に表れていると考えられる。

Fig.3に示した悉皆調査地域内における微動のH/Vスペクトルの形状は、3地点と同様に明確なピーク形状を有するものであったので、同様の基底面を有していることが示唆される。また、悉皆調査地域の微動による地盤卓越周期(Fig.3)は、1~1.5秒程度であるので、基底面の深さは17-1(1.28秒), 17-2(1.4秒)とほぼ同程度と推定されるが、北側の海岸に近い地域では1.5~2秒となる地点も見られるので、より深くなっている可能性がある。

Note

地質年代	記号	地層区分
	Asd	砂丘砂層(上部層)
	Ac1	粘性土層(上部層)
完新統	As1	砂質土層(上部層)
	Ac2(mc)	海成粘性土層(中部層)
	Ac2	淡～汽水性粘性土層(中部層)
更新統	Pm2	泥岩(上部～中部更新統)
新第三紀	T	泥岩・砂岩・火砕岩等

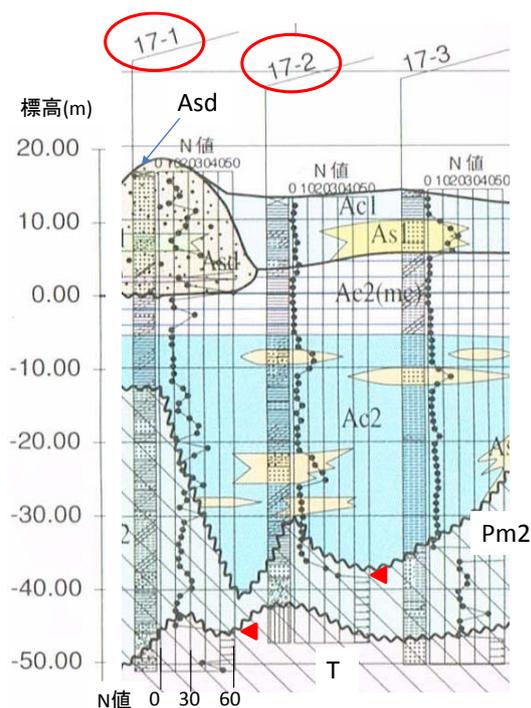


Fig.5 A Part of 17-17' Cross Section<sup>[4]</sup>

Table1 Comparison of Predominant Periods by two methods

単位: 秒

地点名	NIG018	17-1	17-2
H/Vスペクトル(常時微動)	1.3	1.28	1.4
4分の1波長則(S波、概算)	—	1.03	1.28

注)K-net柏崎(NIG018)の4分の1波長則の計算は地盤データがないため未実施

### 3. 中心市街地の観測地震動と鉛直アレイ観測地震動による推定露頭基盤波

#### 3.1 中心市街地での観測地震動

中心市街地の観測記録としては、K-net 柏崎(NIG018)<sup>[16]</sup>で観測された地表面での記録を用いる。K-net 柏崎(NIG018)の位置はFig.3に示すが、現在の柏崎市役所駐車場脇である。観測地震動の対象とした地震の諸元はTable 2に示すが、2007年中越沖地震の本震、2007年中越沖地震の最大余震、2007年能登半島地震の本震である。3地震による水平方向(NS, EW)の最大加速度、最大速度をTable 3に示し、NSまたはEW方向どちらかの加速度時刻歴をFig.6に示す。さらに、両方向の速度応答スペクトルをFig.7に示す。最大加速度(最大速度)はNS, EW方向の順に、中越沖地震の本震で667(130), 514cm/s<sup>2</sup>(85cm/s)、中越沖地震の最大余震で163(17), 186cm/s<sup>2</sup>(9cm/s)、能登半島地震で23(3), 23cm/s<sup>2</sup>(3cm/s)である。3観測地震動の振幅には相違が見られるが、4章で実施する中心市街地の地震動増幅の検討は、この振幅の相違を考慮して行う。

中越沖地震本震の時刻歴では、比較的長周期の成分が卓越していることが分かる。これは、速度応答スペクトルから2~3秒程度の周期成分であることが分かるが、時刻歴にスパ

イク状の波形が見られることも含め、地盤が強い非線形挙動を示していると指摘されている。この地盤非線形性については、主に以下の2つの指摘事項がある。①観測点付近において噴砂の痕跡がみられないこと。K-net 柏崎(NIG018)から60m離れた新潟県の観測点での観測波形、最大値がよく似ていることから、表層の液状化の影響によるものではなく、ある程度エリアを代表する地震記録であると考えられる<sup>[1], [17]</sup>。②このスパイクについては、液状化を示唆するサイクリックモビリティの影響とも考えられ、今後、液状化層の深さ、厚さと地表面での地盤変状との関係の解明が望まれる<sup>[18]</sup>。

一方、建物被害に影響の大きい地震動は周期 1~2 秒で大きな応答を示す地震動であると指摘されている<sup>[11]</sup>。中越沖地震本震の中心市街地での建物被害の原因は、古くからの市街地であり老朽化した木造建物が多く残っていたこと、重い重量の屋根、大きな開口部の影響などが考えられるが、速度応答スペクトルに見られるように、1~2 秒の周期帯の応答も比較的大きく、大きな建物被害に至った要因であると指摘されている<sup>[12]</sup>。

他の2つの観測地震動に見られる速度応答スペクトルのピークの周期帯は、中越沖地震の最大余震で1秒以下と1~2秒程度、能登半島地震で1~2秒程度である。

Table2 List of three Earthquakes

	発生日時	M <sub>J</sub>	震源深さ	最大震度
2007年中越沖地震(本震)	2007年7月16日10時13分	6.8	17km	6強
2007年中越沖地震(最大余震)	2007年7月16日15時37分	5.8	23km	6弱
2007年能登半島地震(本震)	2007年3月25日9時41分	6.9	11km	6強

Table3 List of Recorded Max. Acc. and Max. Vel. at NIG018

地震名	2007年中越沖地震 (本震)		2007年中越沖地震 (最大余震)		2007年能登半島地震 (本震)	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW
最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	667	514	163	186	23	23
最大速度(cm/s)	130	85	17	9	3	3

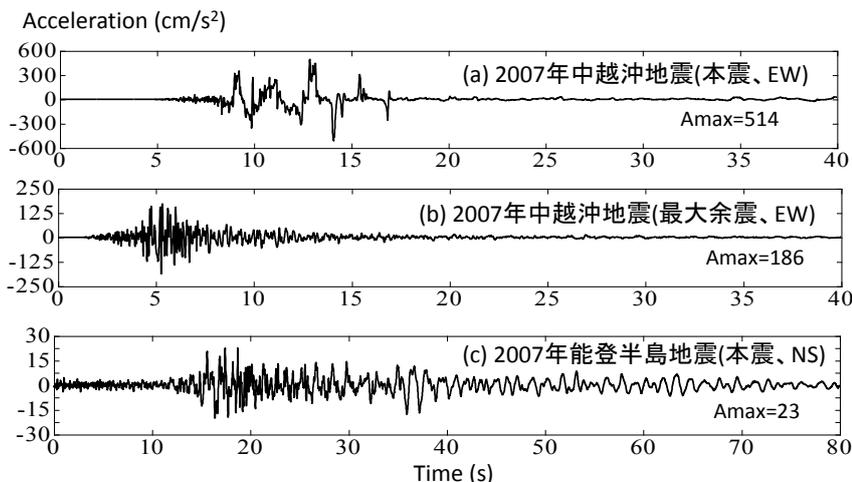


Fig.6 Time History of Recorded Acceleration at NIG018

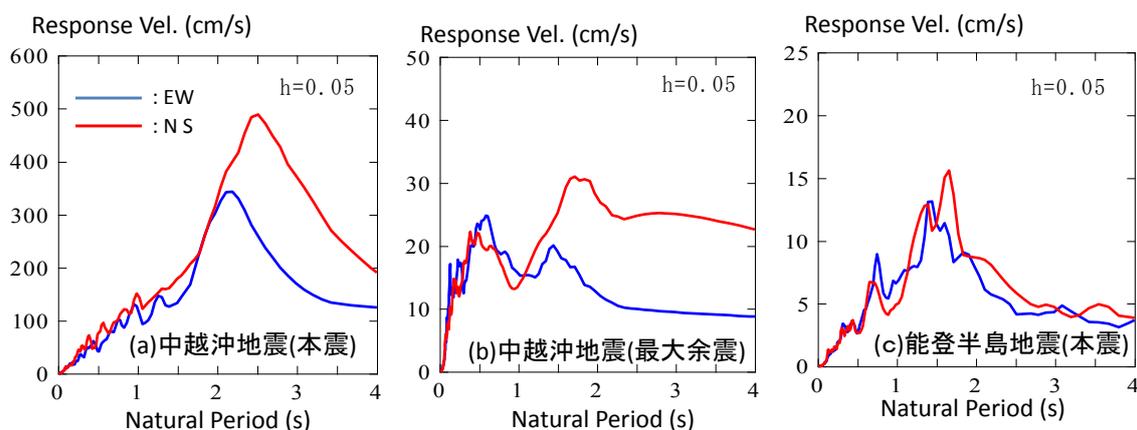
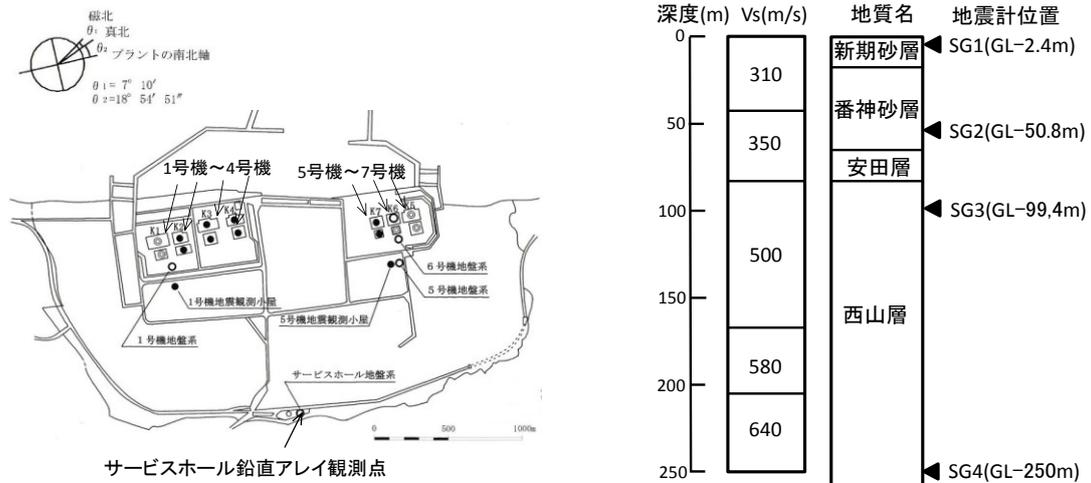


Fig.7 Velocity Response Spectrum at NIG018

### 3.2 鉛直アレイ観測点の地盤と観測記録

中心市街地から 8km 程度離れた東京電力柏崎刈羽原子力発電所では、地震動観測<sup>[19]</sup>が実施されており、その一環として原子力発電所メインゲートの東側のサービスホール (Fig.8)において、表層付近から深度 250m までの砂層及び泥岩層内の 4 深度で鉛直アレイ地震観測が実施されている<sup>[19]</sup>。サービスホールの深度 250m までの地盤の S 波の速度構造、地質構造、地震計の埋設深度を Fig.8 に示す。サービスホールの標高は 67.5m であり、発電所 1-4(標高 5.3m)、5-7 号機(標高 12.3m)に比べて高くなっている。そのため、発電所 1-7 号機の地盤にはほとんど存在しない新期砂層と番神砂層が、安田層と西山層(泥岩)の上部を覆っている<sup>[13]</sup>。地盤の S 波速度は、新期砂層、番神砂層で 310、350m/s、安田層で 350m/s、西山層で 500~640 m/s である<sup>[19]</sup>。地震計は、2.4m、50.8m、99.4m、250m の 4 深度(以下、SG1~SG4)にそれぞれ 3 成分加速度が埋設されている。ただし、水平 NS、EW の方位は、プラント建屋の向きに合わせており、それぞれ真東、真北から時計周りに約 19 回転している<sup>[19]</sup>ので、K-net 柏崎(NIG018)の水平 NS、EW 方向と一致しているわけではない。

Table4 に 3.1 節と同様の 3 地震について、SG1~SG4 で観測された記録の最大加速度を示し、Fig.9(1)に中越沖地震本震による EW 方向の加速度時刻歴を示す。最大加速度を見ると 3.1 節で示した K-net 柏崎(NIG018)の記録と同様に、3 地震で振幅の相違が見られる。また、中越沖地震の本震では、表層に向かって最大加速度は減少する傾向が見られるが、他の 2 地震動では、増大する傾向が見られる。Fig.9(1)の中越沖地震本震の加速度時刻歴では、表層に向かって短周期成分が少なくなっており、地盤非線形化の影響が示唆される。最大加速度が表層に向かって減少する傾向は、短周期成分の少なくなっていることの影響と考えられる。中越沖地震本震の最大加速度において、減少の変化が大きいのは SG2(GL-50.8m)と SG3(GL-99.4m)の間であり、SG3 以浅の地盤が、それ以深に比べて大きく非線形化していたと考えられる。また、中越沖地震後、サービスホールの建物及び観測井周辺の地盤は、相対的に 15cm 程度沈下し、表層地盤が極めて大きなひずみを受けていたことが示唆されている。なお、付近に噴砂などは確認されていない<sup>[13]</sup>。



(a) 柏崎刈羽原子力発電所と鉛直アレイの観測点 (b) 鉛直アレイの地盤構造とS波速度

Fig.8 Details of Service Hall Downhole Array Earthquake Observation

Table4 List of Recorded Max. Acc. at Service Hall Downhole Array

単位: cm/s<sup>2</sup>

地震名	2007年中越沖地震 (本震)		2007年中越沖地震 (最大余震)		2007年能登半島地震 (本震)		
	方向	NS	EW	NS	EW	NS	EW
SG1		347	437	163	186	52	35
SG2		340	411	128	117	25	20
SG3		403	647	138	123	25	17
SG4		430	728	140	111	15	11

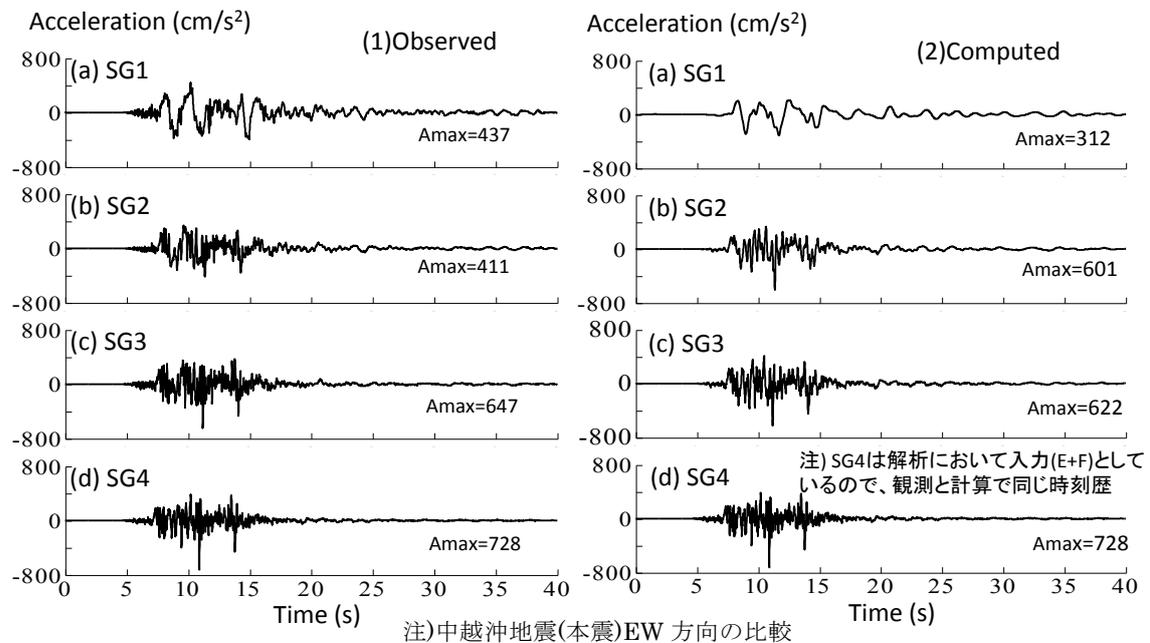


Fig.9 Comparison of Time History at 4-depth by Observation and Computation

### 3.3 鉛直アレイ観測点での地震応答解析と露頭基盤波の推定

#### 3.3.1 地震応答解析

1次元重複反射理論による等価線形地震応答解析を実施し、深度250m位置での露頭基盤波を評価する。これはそれ以浅の地盤をはぎ取った仮想の基盤面における地震動で、以浅の地盤の影響を除いたものに相当する。1次元重複反射理論による解析プログラムはSHAKE<sup>[14]</sup>等がよく知られているが、一般に、観測記録を用いた検討では、解析結果がサイト地盤の非線形特性を含む物性及び減衰に大きく依存するので、観測記録を用いて地盤のS波速度構造や減衰定数の分布を同定する逆解析が実施されることが多い。本論では、サービスホールの中越沖地震本震記録を用いて、遺伝的アルゴリズムによる逆解析により、露頭基盤波を評価している文献<sup>[13]</sup>を参考として、応答解析モデルの入力パラメータを決定し地震応答解析を実施する。解析では、SG4の観測波(E+F、Eは上昇波、Fは下降波)を入力として実施し、SG4におけるEを求め、露頭波(2E)を作成する。応答解析モデルについて以下に示す。

Fig.8のサービスホール直下の地盤を、水平成層として34層に分割する。地盤各層の密度( $\rho$ )は土質などから $1.6\sim 2.0\text{g/m}^3$ と仮定し、初期せん断剛性( $G_0$ )は $V_s$ (Fig.8)から(5)式を用いて算出する。地盤の非線形モデルはH-Dモデルとし(6)、(7)式を用いる<sup>[5], [15]</sup>。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (5)$$

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_{0.5}} \quad (6) \quad h = h_{\max}(1 - G/G_0) \quad (7)$$

ここで、 $\gamma$ はせん断ひずみ、 $\gamma_{0.5}$ は基準ひずみ、 $G$ はせん断剛性であり、 $G/G_0$ はせん断剛性低下率である。 $h$ は減衰定数、 $h_{\max}$ は最大減衰定数である。(6)、(7)式において $G/G_0$ 、 $h$ は、 $\gamma_{0.5}$ 、 $h_{\max}$ で表現されているが、この2つのパラメータを文献<sup>[13]</sup>を参考として設定する。設定した値をTable5に示す。特に、新規砂層の $\gamma_{0.5}$ は既往の砂質土の室内試験結果より小さく、比較的小さなせん断ひずみの段階から非線形化が発生し、 $h_{\max}$ は既往の室内試験結果より大きな値となっている。番神砂層の $\gamma_{0.5}$ は既往の砂質土の室内試験結果<sup>[5]</sup>と同程度であるが、 $h_{\max}$ はより大きな値となっている。安田層(粘性土)には既往の粘性土の室内試験結果<sup>[5]</sup>の値を設定し、西山層(泥岩)は弾性として扱う。粘性減衰はMaxwell型として減衰定数2%を設定する。

Table5 Parameters for Nonlinear Computation

地層名	$\gamma_{0.5}$	$h_{\max}$
新規砂層	$2.0 \times 10^{-4}$	0.35
番神砂層	$1.0 \times 10^{-3}$	0.35
安田層	$1.8 \times 10^{-3}$	0.17
西山層	弾性	

注)  $\gamma_{0.5}$ : 基準ひずみ、 $h_{\max}$ : 最大減衰定数

### 3.3.2 地震応答解析結果と推定露頭基盤波

Fig.9 (2)に中越沖地震本震による解析結果のSG1～SG4のEW方向加速度時刻歴を示す。同図(1)の観測記録と比較して表示しているが、SG4の時刻歴は応答解析の入力としているので、両者は同じである。観測記録と比較して、SG2、SG3では波形的特徴は再現されている。SG1で、振幅は小さくなる傾向は見られるが、非線形化に伴い長周期成分が卓越する傾向は再現されている。検討対象としている3つ地震に対してサービスホール深度250m位置で評価した推定露頭基盤波(2E)の加速度時刻歴(NS, EWのどちらか1方向)をFig.10に、速度応答スペクトル(両方向)をFig.11に示す。特に中越沖地震本震の時刻歴においては、K-net 柏崎(NIG018)の波形と比較して短周期成分が多く見られる。速度応答スペクトルのピーク位置は、中越沖地震本震で周期1秒以下と2.5～3秒付近、中越沖地震最大余震で周期1秒以下、能登半島地震で周期1秒以下と2秒付近に見られる。

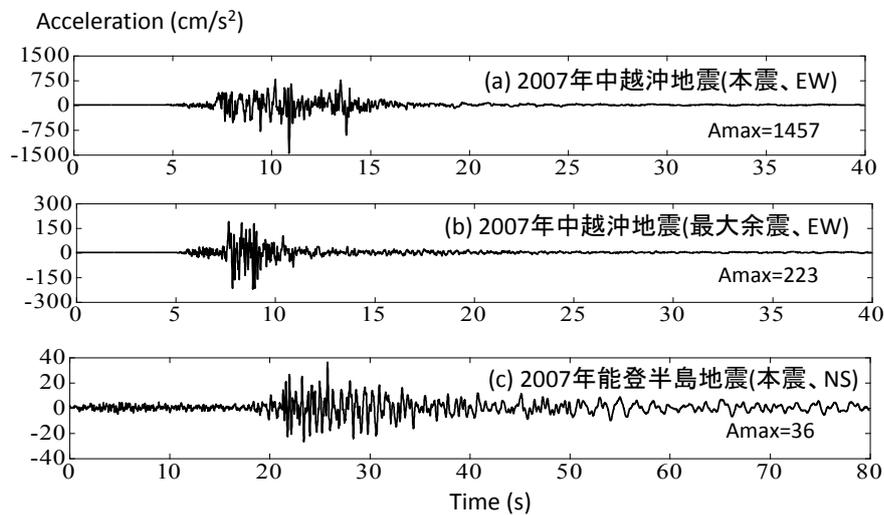


Fig.10 Time History of Computed Earthquake Motions of Bedrock Outcrop

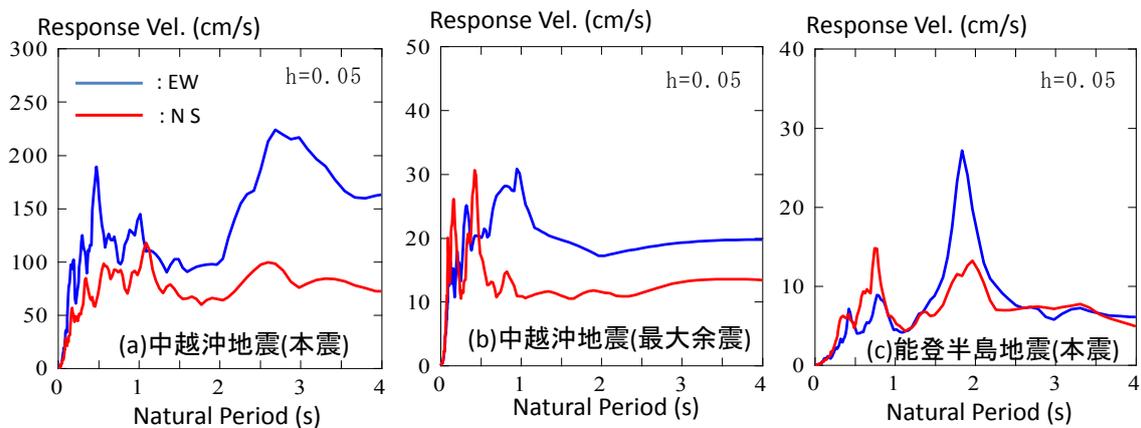


Fig.11 Velocity Response Spectrum by Computed Motions of Bedrock Outcrop

#### 4. 中心市街地における表層地盤の地震動増幅特性

中心市街地の基底面以深には新第三紀の地層である西山層があり，サービスホールの推定露頭基盤波(2E)を評価した深度 250m も西山層であった．算出した推定露頭基盤波(2E)が，西山層に対して広域で適用できるものと仮定して，中心市街地での地震動増幅特性を検討する．

3つの地震に対する K-net 柏崎(NIG018, 2E, 地表面)と推定露頭基盤波(2E)との速度応答スペクトルの比率(K-net 柏崎/推定露頭基盤波)を増幅率のスペクトルとして Fig.12 に示す．ここでは，増幅率スペクトルのピーク位置の周期を，対象地震で見られた地盤卓越周期として扱う．3地震共に NS 方向(赤線)の増幅率が EW 方向(青線)よりも大きくなっており，方向別の相違が見られる．

最も振幅の小さい能登半島地震の増幅率のスペクトルには，周期 1.1~1.6 秒間にピークが見られる．この周期帯は 2.2 節で示した K-net 柏崎(NIG018)の微動による地盤卓越周期 1.3 秒付近と対応しているものと考えられる．主に線形域で振動していたこと，基底面から上方の表層地盤全体の振動がこのピークに影響していることが示唆される．他の2地震動の増幅率のピークは，中越沖地震の最大余震で 1.4~1.6 秒程度，中越沖地震の本震では，EW 方向で 2.0 秒程度，NS 方向で 2.1~3.0 秒程度となっている．この2地震動に見られる振幅の増大に伴うピーク周期の伸びは，基底面から下方の地盤は硬質であるので地盤非線形の影響は考えにくく，表層地盤の非線形性の影響と推測することができる．また，地盤非線形性に関する詳細な検討は，地盤データ等に関する情報収集が十分に出来なかつたため，本論では実施していない．

以下では，推定露頭基盤波の速度応答スペクトル(Fig.11)と増幅率スペクトル(Fig.12)から K-net 柏崎(NIG018)の速度応答スペクトル(Fig.7)について考察する．中越沖地震の最大余震及び能登半島地震の K-net 柏崎(NIG018)における速度応答スペクトルは，推定露頭基盤波と増幅率スペクトルの両者のピークを反映した形状であると考えられる．これは，推定露頭基盤波の卓越成分の周期と地盤卓越周期がある程度離れていたため，両者の影響が表わ

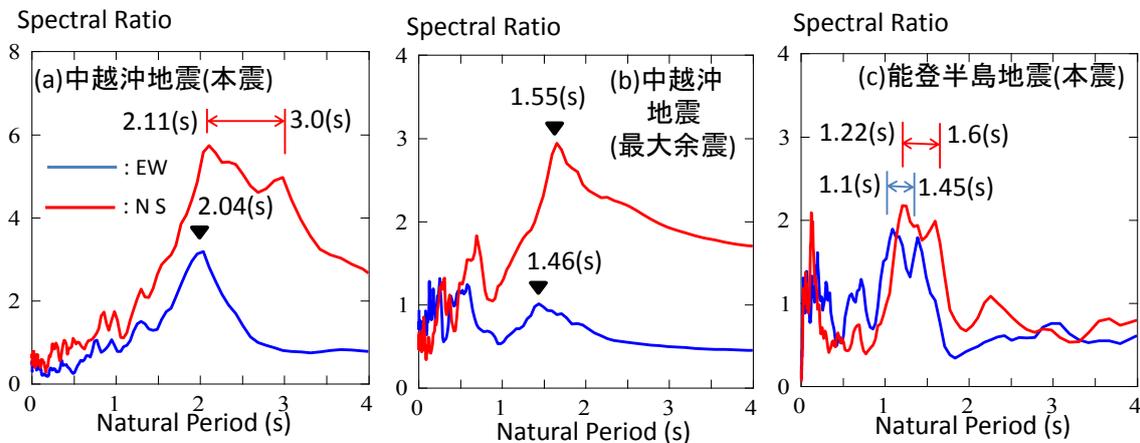


Fig.12 Spectral Ratio of NIG018 to Bedrock Outcrop

れたと推測される。一方、中越沖地震本震の K-net 柏崎(NIG018)の速度応答スペクトルでは、周期 2~3 秒程度の大きなピークがあり、推定露頭基盤波の応答スペクトル(Fig.11)に見られた周期 1 秒程度以下の成分のピークはほとんど見られない。これは、推定露頭基盤波の卓越成分であった周期 2.5~3 秒程度の成分(Fig.11)が、地盤非線形の影響を受けて伸びた地盤卓越周期の影響を受けて大きく増幅され、地表面地震動として表れたためと考えられる。また、中越沖地震本震で周期 2~3 秒の成分が特に増幅されていることは、Fig.12 の中越沖地震本震の周期 2~3 秒程度の増幅率が 3~6 であり、他の 2 地震動のピーク位置での増幅率が 1~3 程度であるので、2 倍程度であることから見る事ができる。

## 5. まとめ

2007 年中越沖地震において、建物被害等が多数発生した柏崎中心市街地を対象として、沖積層の表層地盤における地震動増幅について検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 中心市街地内の K-net 柏崎(NIG018, 地表面)において、中越沖地震(本震)で観測された地震動は、周期 2~3 秒程度で大きな応答を示す地震動であった。建物被害に影響の大きい周期 1~2 秒でも比較的大きな応答を示しており、多くの建物被害等を発生させた原因の一つであったことが確認された。
- (2) 中心市街地を対象として、常時微動の単点観測を実施し、地盤卓越周期について検討した。K-net 柏崎(NIG018)の地盤卓越周期は 1.3 秒程度であり、基底面以浅の表層地盤の影響によるものと推察された。また、中心市街地の地盤卓越周期は 1~2 秒程度であったが、K-net 柏崎(NIG018)と同様の厚い沖積層の影響を受けていることが示唆された。
- (3) 東京電力柏崎刈羽原子力発電所サービスホールでの鉛直アレイ地震観測記録を用いて露頭基盤波を推定し、K-net 柏崎(NIG018)での観測地震動と比較することで地震動の増幅率について検討した。その結果、地震動の振幅の小さかった能登半島地震では、周期 1.1~1.6 秒程度の成分に増幅が見られた。微動から推定された地盤卓越周期 1.3 秒と対応していると考えられ、主に線形域での応答であったことが推察された。増幅される周期成分(地盤卓越周期)は、中越沖地震の最大余震で 1.4~1.6 秒程度、中越沖地震の本震で 2~3 秒程度と地震動の振幅が増大するに従って長くなっていた、これは、表層地盤の非線形性の影響と推察された。また、中越沖地震本震の周期 2~3 秒の増幅率は 3~6 程度であり、他の 2 地震動の 2 倍程度となっていた。これは、中越沖地震本震の推定露頭基盤波において周期 2.5~3 秒程度に優勢な成分が見られ、長周期化した地盤卓越周期と重なり大きな増幅率となったことが示唆された。また、この地盤増幅特性は K-net 柏崎(NIG018)の観測記録から求めたものであるが、同様の表層地盤を有すると考えられる中心市街地の広域としての特性であることも推測された。
- (4) 表層地盤における地盤非線形性に関する詳細な検討は、今後検討していきたい。

## 謝辞

本論文では、防災科学技術研究所 強震観測網(K-net, Kik-net)の観測記録及び東京電力

株式会社が公開した地震観測記録を使用させていただきました。

## 文献

### 図書

- [1] 日本建築学会：2007年能登半島地震災害調査報告 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告；丸善株式会社，pp.178-356，2010.
- [2] 日本建築学会：地震荷重－性能設計への展望；丸善株式会社，pp.137-138，2008.
- [3] 建設省北陸地方建設局・北陸技術事務所：新潟平野部の地盤図集；1981.
- [4] 新潟県地質調査業協会：新潟県地盤図 新潟県地盤図説明書；2002.
- [5] 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計；pp.51-57，2006.

### 論文

- [6] 時松幸次，新井洋，関口巖：2004年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形震動増幅が小千谷の木造住宅被害に与えた影響；日本建築学会構造系論文集，第620号，35-42，2007
- [7] 大熊裕輝，松岡昌志，山崎文雄，原田隆典：宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定；土木学会論文集 No.696，I-58，261-272，2001.
- [8] 大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用；土木学会論文集 No.489，I-27，251-260，1994.
- [9] 岩野武尊，田村良一：2007年新潟県中越沖地震による柏崎中心部の建物被害と地盤特性について；日本建築学会北陸支部大会研究報告集，第61号，70-73，2018.
- [10] 太田裕，後藤典俊：S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み；物理探鉱，第29巻第4号，31-41，1976.
- [11] 境有紀：強震観測点周辺の被害データを用いた地震動の性質と建物被害の関係の検討；日本地震工学会論文集，第7巻，第2号(特集号)，180-189，2007.
- [12] 境有紀，川岡裕康，林佑樹，飯塚裕暁：2007年新潟県中越沖地震における強震観測点周辺の被害状況と地震動の対応性；日本地震工学会論文集，第8巻，第4号，59-93，2008.
- [13] 時松幸次，新井洋，蓑和健太郎：柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録から推定した地盤非線形性状と基板露頭波；日本建築学会構造系論文集，第73巻，第630号，1273-1280，2008.
- [14] Schnabel,P.B. ,J.Lyamer, and H.B.Seed: SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC Report,No,72-12,1972.
- [15] Hardin,B.O. and Drnevich,V.P: Shear Modulus and Damping in Soils Design Equations and Curve ; Proc. ASCE, SM7, 667-692, 1972.

電子文献, その他

- [16]防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET,KiK-NET),  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- [17]防災科学技術研究所 強震観測管理室：K-NET 柏崎(NIG018)に関して,  
[https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/chuetsuoki20070716/K-NET\\_Kashiwazaki.pdf](https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/chuetsuoki20070716/K-NET_Kashiwazaki.pdf).
- [18]小長井一男, 末富岩雄他：2007 年新潟県中越沖地震の被害とその特徴；土木学会,  
[http://www.jsce.or.jp/library/eq\\_repo/Vol3/05/report-combined-V6.pdf](http://www.jsce.or.jp/library/eq_repo/Vol3/05/report-combined-V6.pdf).
- [19]東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所における 2007 年新潟県中越沖地震など時刻歴データ, 領布元 震災予防協会 (DVD-R) .