疑似点震源モデルに基づく1995年新潟県北部の地震による阿賀野市高田集落での強震動の推定

秦 吉弥1・湊 文博2・山内 政輝3・大川 雄太郎4

1正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: fminato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

3学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: myamauchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

4学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yokawa@civil.eng.osaka-u.ac.jp

1995年4月1日に発生した新潟県北部の地震では、震源域において住家の倒壊などの深刻な被害が報告されており、被災地点に作用した強震動を評価することは非常に重要である。しかしながら、1995年兵庫県南部地震直後に発生した大規模地震を対象とするため、サイト特性置換手法の採用や特性化震源モデルの構築などが困難であった。本稿では、疑似点震源モデルを用いて、1995年新潟県北部の地震において阿賀野市高田集落に作用した地震動を評価した結果について報告する。その際、高田集落において高密度常時微動計測や臨時地震観測を実施することで、サイト増幅・位相特性を評価した。

Key Words: strong motion, microtremor measurement, seismic observation, residential wooden house

1. はじめに

大規模地震による深刻な被害が発生した地点において 当該地震時の強震動が偶然にも観測されるケース¹は、 ごく稀である。そのため、対象とする被災地点において 常時微動計測や臨時地震観測などを行い、得られた記録 などに基づいて強震動を事後推定する試み²が行われて いる。その際、地震動推定手法として、断層モデルに基 づく手法(特性化震源モデル³)と経験的サイト増幅・位相 特性を考慮した統計的グリーン関数法⁴を組合せた手法 等)もしくはサイト特性置換手法⁵などが採用されている。 しかしながら、これらの推定手法の採用条件の一つとし て、対象とする地点の周辺において比較的多くの観測地 震動が得られていることが挙げられる。

1995年4月1日に発生した新潟県北部の地震(以後, 1995年新潟県北部の地震もしくは本震と呼ぶ:図-1参照)では、震源域において深刻な被害が報告⁶⁰されている。その中でも、震源近くに位置する阿賀野市高田集落(図-1参照)では、強震動の作用による木造住家の半壊と全壊が七割を超える深刻な被害が報告⁶⁰されている。この点に関して、大木ほか⁸は、比較的住家被害が大きかった高田集落および上高田集落での墓石の転倒状況に基づき、

1995年新潟県北部の地震による観測地震動としては, 強震波形(図-2(a),(b)参照)がJMA新潟¹⁰において, 震度 階(震度4)がJMA阿賀野¹⁰において記録されているのみ であり(ともに図-1参照), 高田集落における強震動評価

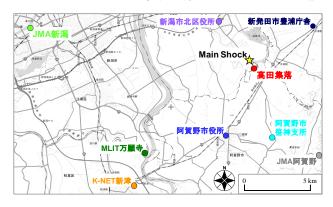


図-1 1995年新潟県北部の地震の震源域における観測点の分布

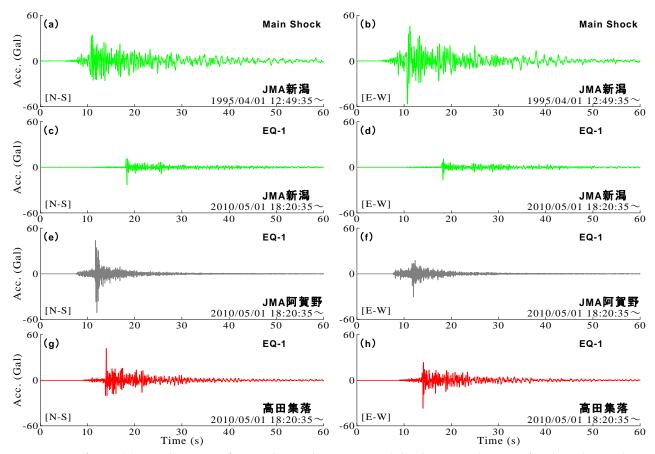


図-2 1995年新潟県北部の地震によるJMA新潟での観測地震動、および本震震源域での小地震による対象地点での観測地震動

を実施するにあたって、サイト特性置換手法の採用は困難であるといえる。さらに、我が国の強震観測網¹⁰が発展途上であった時代(1995年兵庫県南部地震の直後)に発生した1995年新潟県北部の地震は特性化震源モデルの構築に適しているとは言い難いため、断層モデルに基づく手法の採用も困難である。

上述した課題を解決するための一つの方法として、疑 似点震源モデルの採用11,12)が挙げられる. 疑似点震源モ デルの特徴の一つとして、強震動の生成に関わる各々の サブイベントに対し、その内部におけるすべりの時空間 分布を詳細にはモデル化せず、各々のサブイベントが生 成する震源スペクトルのみをモデル化するという点が挙 げられる. 疑似点震源モデルは野津¹³⁾によって提案・開 発された地震動推定手法であり、海溝型地震¹⁴⁾・スラブ 内地震¹⁵⁾・内陸地殻内地震¹⁶⁾⁻²¹⁾に適用され、断層モデル に基づく手法と同等もしくはそれ以上の精度で地震動の 推定が可能であることが報告(3)21)されている. この点に 関して、著者ほか¹¹⁾は、1900年宮城県北部の地震時に鳴 瀬川堤防に作用した強震動を疑似点震源モデルに基づい て推定しているが、100年以上昔に発生した歴史地震を 対象としているために、 地震動推定手法の適用性の確認 が十分に行われていない. また著者ほか¹²⁾は、1993年能 登半島沖地震において珠洲市内の被災地に作用した地震 動を疑似点震源モデルに基づいて推定しているが、推定 実績がまだ数少ないのが現状である.

上述した背景を踏まえ本稿では、疑似点震源モデルを用いて、1995年新潟県北部の地震において阿賀野市高田集落に作用した強震動を推定した結果について報告する. その際、上述した観測地震動(JMA新潟での強震波形・JMA阿賀野での震度階)および震度実績(墓石の転倒状況に基づく高田集落での震度階®)の再現をそれぞれ試みることで、地震動推定手法の適用性の確認を行った.

2. 常時微動計測の高密度実施

常時微動計測は、図-3に示すように、高田集落の全域(一般に立ち入りが可能な区域)の50地点おいて実施した.写真-1に常時微動計測状況の一例を示す.計測は主に昼間に実施し、同型の七台の微動計(七台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器²²)を採用した.計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動HVスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった.計測時間は、一計測点あたり約30分間の単点計測とした.常時微動HVスペクトルの計算処理方法²³としては、まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化した後に、HVスペクトルを算出し、七区間の平均

をとった. 評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能 20 などを考慮して $0.2\sim10$ Hzとした.

図4 は、高田集落内に設けた臨時地震観測点(3.で後述)における常時微動 HV スペクトルと、高田集落全体(49 地点)の常時微動 HV スペクトルを重ね合せたものである。図4 に示すとおり、同じ高田集落内においても、ピーク周波数やスペクトル形状などの常時微動 HV スペクトルの一般的な特徴に一定のバラツキが確認できる。一方で、高田集落全体の HV スペクトル(周波数ごとの平均値およびその標準偏差の分布)に対する臨時地震観測点での HV スペクトルの比較において、両者の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が良い一致を示している。すなわちこれは、臨時地震観測点における地盤震動特性が高田集落全体の地盤震動特性として代表できる可能性が高いことを示唆するものである。

図-5 には、高田集落周辺の既存強震観測点(図-1 参照) における常時微動 HV スペクトルを、高田集落内における常時微動 HV スペクトル(平均生標準偏差)と同時に示す。図-5 に示すとおり、高田集落とその周辺観測点(ただし JMA 阿賀野を除く)では、地質区分 ²⁴が比較的類似しているものの(図-6 参照)、HV スペクトルの特徴は大きく異なっている。この差異は、机上検討の結果だけでは高田集落における地盤震動特性を評価できないことを示唆するものであり、既存観測点においてこれまでに得られた地震記録を高田集落における地盤震動特性の評価に転用できないことも読み取れる。

図-7は,臨時地震観測点(後述)で計測した常時微動に基づく H/V スペクトル(図-4 参照)に対して,理論 H/V スペクトル ²⁵⁾を重ね合せたものである.ここに,理論 H/V スペクトルは,高田集落での標準貫入試験結果とその周辺での PS 検層結果 ⁹に基づき評価した一次元速度構造モデル(図-8 参照)による Rayleigh 波基本モードの楕円率 ²⁵⁾を計算したものである.図-7に示すように,計測 H/V スペクトルと理論 H/V スペクトルが一次ピーク周波数付近において比較的良い一致を示しており,高田集落における工学的基盤以浅の表層地盤は,図-8に示すようなモデルで代表できることが読み取れる.

3. 臨時余震観測の実施

高田集落に設けた臨時地震観測点の位置を図-3に示す、地震観測は、一体型微動探査兼地震計機器²³を上記位置の地表に設置することで実施した。観測期間²⁶は、2010年5月1日~9月6日までの約四か月間である。観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、および観測方向はNS,EW,UDの三成分とし、トリガー加速度レベルは設定せずに、常時観測を継続するシステムとした。その結果、以下に示すような中小地震観測記録がK-NET新津²⁷と同時に得ることができた。

• EQ-1: 2010/05/01 18:20 9km 新潟県中越地方(M₁4.9)

· EQ-2: 2010/05/11 18:18 12km 新潟県下越地方(M₁3.9)

· EQ-3: 2010/06/13 12:32 40km 福島県沖(M₁6.2)

· EQ-4: 2010/08/10 14:50 30km 三陸沖(M_J6.3)

上記 EQ-1~4 のうち、EQ-1 は本震の震源近くで発生した中小地震であることから、本震時に高田集落に作用した地震動を推定する際に、サイト位相特性として利活用できる可能性が高い。図-2(c)~(h)は、EQ-1 によって JMA 新潟、JMA 阿賀野、高田集落で同時に観測された地震動の加速度時刻歴を比較したものである。図-2



写真-1 高田集落内の常時微動計測の状況例



図-3 高田集落内の常時微動計測地点の高密度分布

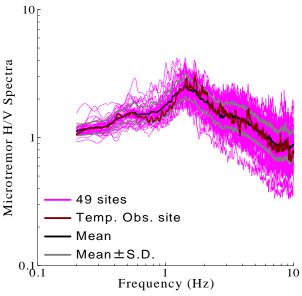


図-4 高田集落内での常時微動H/Vスペクトルの比較

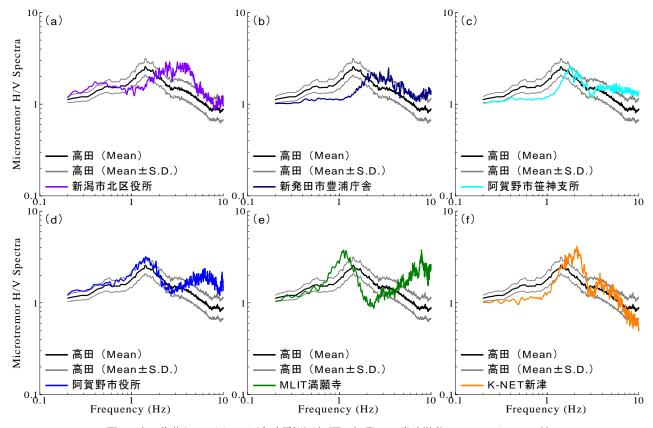


図-5 高田集落とその周辺の既存強震観測点(図-1参照)での常時微動HVスペクトルの比較

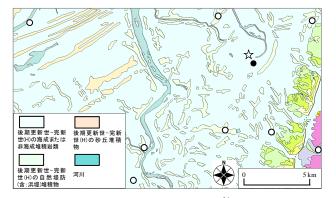


図-6 図-1と同じ図郭内における産総研24による地質分布

Microtremor H/V Spectra	1	Theoretical H/V Takata Res. cluster Measured H/V	Madalah
		Temp. Obs. site	
0	.d.	1 I Frequency (Hz)	10

図-7 高田集落内での計測と理論によるH/Vスペクトルの比較

	深度 (m)	密度 (t/m³)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)
砂質土	6.0	1.8	500	90
粘性土	15.0	1.7	1300	120
砂質土	25.0	1.8	1500	200
砂礫 (工学的基盤)		2.0	5000	800

図-8 高田集落における一次元表層地盤モデル

(c)~(h)に示すとおり、当該三地点における観測地震動の波形形状(すなわち、サイト位相特性)に大きな違いが見られることが確認できる.

4. サイト増幅特性の評価

図-9は、高田集落におけるサイト増幅特性、K-NET新津におけるサイト増幅特性²⁸、JMA新潟およびJMA阿賀野におけるサイト増幅特性をそれぞれ重ね合せたものである。なお、本稿では全て地震基盤〜地表相当のサイト増幅特性となっている。高田集落におけるサイト増幅特性の評価手順は以下のとおりである。まず、K-NET新津

と臨時観測点で同時に得られた地震観測記録(EQ-1~4)を対象に、両地点の震源からの距離の違いによる補正^{29,20)}を考慮したフーリエスペクトルの比率(臨時観測点/K-NET新津)を計算した.次に、この比率をK-NET新津における既存のサイト増幅特性²⁹に掛け合わせることによって、高田集落(臨時観測点)におけるサイト増幅特性を評価³¹⁾した.JMA新潟およびJMA阿賀野におけるサイト増幅特性についても上記と同様のスペクトル比に基づく方法³¹⁾を用いて評価した.

図-9に示すように、高田集落のサイト増幅特性は、構造物の地震被災に比較的大きな影響を及ぼすやや短周期帯域³³を一部含む1~2Hzの周波数帯域において、周辺の観測点に対して大きく卓越していることが読み取れる.また、高田集落に対する本震記録を有するJMA新潟およびJMA阿賀野の比較では、サイト増幅特性の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)に大きな差異が確認でき、JMA新潟やJMA阿賀野で得られた本震記録に関する情報を、本震時に高田集落に作用した地震動として転用するのが困難であることが読み取れる.

5. 疑似点震源モデルの構築による強震動の推定

疑似点震源モデル $^{11)21}$ は,従来の特性化震源モデル 3 よりも更に単純化された震源モデルであり,サブイベントの破壊に起因する震源スペクトルはオメガスクエアモデル 33 に従うと仮定する.これに伝播経路特性 29,30 とサイト増幅特性(\mathbf{Z} -9参照)を乗じることにより,JMA新潟,JMA阿賀野,高田集落における地震動のフーリエ振幅を評価した.評価したフーリエ振幅と,JMA新潟,JMA阿賀野,高田集落で得られた小地震(\mathbf{EQ} -1)による観測記録(\mathbf{Z} -2(\mathbf{C})~(\mathbf{h})参照)のフーリエ位相をそれぞれ組み合

わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換³⁴を実施することにより強震波形を計算した.

疑似点震源モデルにおける入力パラメータは、サブイベントーつあたり、位置情報(緯度・経度・深さ)、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c である。 $\mathbf{表}$ -1に設定した入力パラメータの一覧を示す。本稿では、サブイベントの位置情報として、1995年新潟県北部の地震の震源を採用した。サブイベントの地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c は、JMA新潟における本震観測記録(地震速度波形および絶対加速度応答スペクトル(減衰定数

表-1 構築した疑似点震源モデルのパラメータの一覧

	Location			Seismic	Corner
•	Latitude	Longitude	Depth	Moment	Frequency
	(deg.)	(deg.)	(km)	$M_0(Nm)$	(Hz)
Subevent	37.890	139.247	16	0.4E+18	0.49

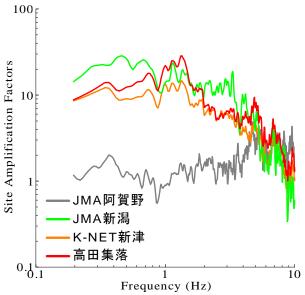


図-9 サイト増幅特性(地震基盤〜地表)の比較評価

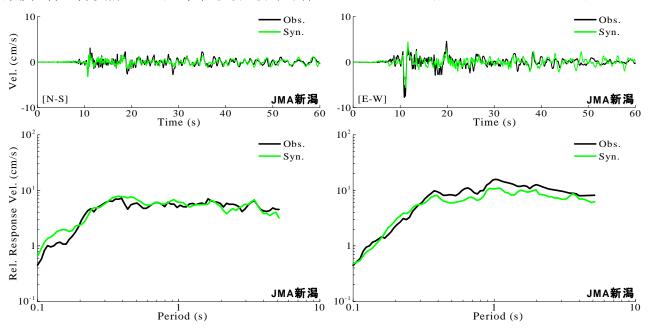


図-10 JMA新潟で観測された本震記録の再現に基づく地震動推定手法の適用性確認

5%))に対する類似性を考慮して,試行錯誤により設定した.**図-10**に示すように,JMA新潟における観測地震動と推定地震動が比較的良い一致を示していることから,地震動推定手法の適用性が確認できる.

図-11(a)~(d)に1995年新潟県北部の地震によるJMA阿賀野での推定地震動の速度・加速度波形を示す. 推定地震動の気象庁計測震度¹⁰は3.9と算定され,本震記録(震度階:4)と良い一致を示す結果が得られた.

図-11(e) ~ (h) は、1995年新潟県北部の地震における高田集落(臨時地震観測点)での推定地震動の速度波形・加速度波形を水平二成分について示したものである。ここに、高田集落に作用した本震時の地震動は、少なからず地盤の非線形性の影響を受けているものと考え、高田集落の表層地盤モデル(図-8参照)に対して線形/非線形の重複反射理論^{50,30)}を適用⁵⁷⁾し、工学的基盤以浅の表層

地盤の非線形挙動の影響を考慮した. その結果,高田集落における推定地震動の気象庁計測震度¹⁰は6.0と算定され,大木ほか⁸による墓石の転倒状況に基づく本震時の評価震度(震度階:6)と類似する結果となった.

上述したJMA新潟における観測地震動と推定地震動の類似性(図-10参照), JMA阿賀野における観測地震動に基づく震度階に対する再現性(図-11(a)~(d)参照), 高田集落における被災状況を踏まえた震度階⁸に対する再現性(図-11(e)~(h)参照)を考慮すると,高田集落における推定地震動は一定の精度を有していると推察される.

図-11(i),(j)は、JMA新潟における観測地震動の応答スペクトル、JMA阿賀野および高田集落における推定地震動の相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を水平二成分について比較したものである。同図には、1995年新潟県北部の地震の直前に発生した1995年兵庫県南部

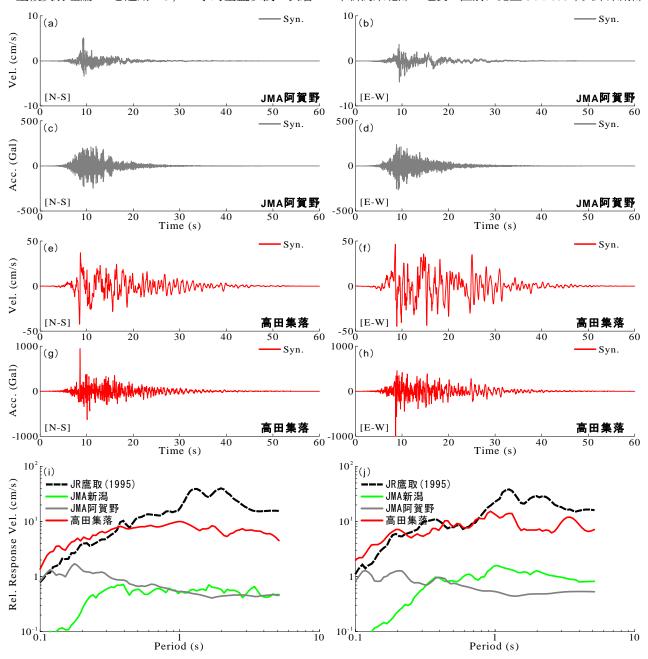


図-11 1995年新潟県北部の地震によるJMA阿賀野での推定地震動,および高田集落での推定地震動とその特徴

地震によるJR鷹取駅での観測地震動⁸⁹の相対速度応答スペクトル(減衰定数5%)を比較対象として示す. 図-11 (()),(())に示すとおり、高田集落の応答スペクトルは、JMA新潟およびJMA阿賀野の応答スペクトルに対して水平二成分ともに全ての周期帯域(0.1~5s)において連続的に上回っていることが読み取れる. 一方で、JR鷹取駅の応答スペクトルに対して、0.1~0.5s(N-S成分)および0.1~0.8s(E-W成分)の周期帯域において高田集落の応答スペクトルは同等程度の速度応答を示している.

6. まとめ

本稿では、新潟県阿賀野市高田の集落において高密度 常時微動計測および臨時地震観測を実施し、得られた記録と疑似点震源モデルの組合せなどに基づき、1995年新潟県北部の地震時に高田集落に作用した地震動を推定した、得られた知見を以下に示す。

- (1) 高田集落とその周辺の既存強震観測点では、地質区分が類似しているものの、常時微動HVスペクトルの特徴が異なっていることから、既存観測点でこれまでに得られた地震記録(観測点におけるサイト増幅・位相特性)を直接的に転用することはできない.
- (2) 気象庁観測点(JMA新潟・JMA阿賀野)と高田集落では、サイト増幅・位相特性の特徴が比較的異なっていること、および位置関係において一定の距離間隔を有していることから、JMA新潟やJMA阿賀野で得られた本震観測記録を1995年新潟県北部の地震時に高田集落に作用した地震動と見なすことはできない.
- (3) 本稿において構築した1995年新潟県北部の地震の疑 似点震源モデルに基づく地震動推定手法を用いれば、 JMA新潟で得られた観測地震動、JMA阿賀野におい て記録された震度階、高田集落での墓石の転倒状況 に基づき既存評価された震度階、をそれぞれ一定の 精度で再現可能である.
- (4) 上記(3)で得られた知見を踏まえて、1995年新潟県北部の地震による疑似点震源モデルと高田集落におけるサイト増幅・位相特性の組合せを適用した結果、0.1~5sの周期帯域においてJMA新潟およびJMA阿賀野に本震時に作用した地震動を上回る速度応答、および0.1~0.6s付近の周期帯域においてJR鷹取(1995年兵庫県南部地震)で観測された地震動と同等程度の速度応答、をそれぞれ示す地震動が推定された.

今後は、本稿の推定地震動を用いて、住家を対象とした動的解析などを実施していく予定である.

謝辞: 常時微動計測および臨時地震観測の実施にあたっては、現地の住民の皆様などに大変お世話になりました. 本研究の遂行にあたって、科学研究費補助金・若手研究 A「超高密度地震観測に基づく宅地造成斜面におけるダ イナミック地すべり挙動の広域的評価(JP15H05532)」の一部を使用しました.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- Hata, Y., Goto, H. and Yoshimi, M.: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake (M_W7.0) observed by a dense seismic array, Seismological Research Letters, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
- 2) 秦吉弥, 野津厚:被害地震の揺れに迫る一地震波形 デジタルデータ CD 付き一,大阪大学出版会, ISBN: 978-4-87259-565-9, 2016.
- 3) 野津厚:内陸地殻内地震によるやや短周期地震動の 再現に適した震源のモデル化手法,港湾空港技術研 究所報告, Vol.50, No.4, pp.133-195, 2011.
- 4) 野津厚, 菅野高弘:経験的サイト増幅・位相特性を 考慮した強震動評価手法―因果性と多重非線形効果 に着目した改良―, 港湾空港技術研究所資料, No. 1173, 28p., 2008.
- Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of* the Seismological Society of America, Vol.101, No.2, pp. 688-700, 2011.
- 大木靖衛,徐輝竜,渡部直喜,鈴木幸治,佐藤修,河内一男:1995年新潟県北部の地震について,第四紀研究,Vol.35,No.3,pp.153-163,1996.
- 五十田博:1995 年新潟県北部地震における建築物の 被害調査報告,月刊地球,Vol.17,pp.748-752,1995.
- 8) 大木靖衛,徐輝竜,渡部直喜,鈴木幸治,佐藤修: 1995 年新潟県北部地震の震度分布と伏在活断層,月 刊地球, Vol.17, pp.766-773, 1995.
- 9) 棈木紀男, 笹川考義, 荏本孝久: PS 検層と微動アレー観測による 1995 年新潟県北部地震の震源域・福島 潟周辺の一地点における表層地下構造, 日本建築学会講演梗概集, pp.219-220, 2005.
- 10) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 11) 秦吉弥,常田賢一,酒井久和,一井康二,静間俊郎, 丸山喜久:疑似点震源モデルに基づく 1900 年宮城県 北部の地震における鳴瀬川堤防サイトでの地震動の 評価,地盤と建設,Vol.33,No.1,pp.187-192,2015.
- 12) 秦吉弥,村田晶,山内政輝,宮島昌克:疑似点震源 モデルに基づく 1993 年能登半島沖地震によって被災 した市街地での地震動の評価,土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, 2017. [掲載決定]
- 13) 野津厚:強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源 モデルをより単純化する試み―疑似点震源モデルに よる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレ ーション,地震,第2輯,第65巻,pp.45-67,2012.
- 14) 若井淳, 長坂陽介, 野津厚: 疑似点震源モデルによる 2003 年 5 月 26 日宮城県沖のスラブ内地震の強震動シミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I_818-829, 2014.
- 15) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地 設内地震による強震波形の評価—2005 年福岡県西方

- 沖の地震への適用例—, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, I-245, pp.489-490, 2012.
- 16) 秦吉弥, 野津厚, 丸山喜久, 酒井久和: 疑似点震源 モデルを用いた内陸地殻内地震による強震波形の評 価-2007 年新潟県中越沖地震への適用例-, 日本地 震工学会大会-2012 梗概集, pp.80-81, 2012.
- 17) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地 殻内地震による強震波形の評価—2000 年鳥取県西部 地震への適用例—,日本地震工学会大会—2012 梗概 集,pp.74-75,2012.
- 18) 秦吉弥, 野津厚: 疑似点震源モデルを用いた内陸地 設内地震による強震波形の評価—2007 年能登半島地 震への適用例—,第 48 回地盤工学研究発表会講演概 要集,pp.1915-1916,2013.
- 19) Hata, Y. and Nozu, A.: Pseudo point-source models for shallow crustal earthquakes in Japan, *Proc. of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.630, Istanbul, Turkey, 2014.
- 20) Hata, Y. and Nozu, A.: Simulation of strong ground motions for a shallow crustal earthquake in Japan based on the pseudo point-source model, *Proc. of 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand, Paper No.73, 2015.
- 21) Nagasaka, Y. and Nozu, A.: Strong ground motion simulation of the 2016 Kumamoto earthquake of April 16 using multiple point sources, *Earth, Planets and Space*, Vol.69:25, 2017.
- 22) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回 物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006
- 23) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理 探査, Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 24) (国研)産業技術総合研究所:地質図表示システム(地質図 Navi),地質調査総合センターホームページ,2013. https://gbank.gsj.jp/geonavi/(最終閲覧日:2017年8月29日)
- 25) Haskel, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 26) 秦吉弥, 一井康二, 丸山喜久, 福島康宏, 酒井久和, 中村晋: 位相を考慮したサイト特性置換手法の震源 近傍地点での適用—2004 年新潟県中越地震における 検討—, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp.340 -353, 2011.

- 27) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiKnet, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 28) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 29) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 30) 佐藤智美, 巽誉樹:全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 31) 例えば、中尾吉宏、片岡正次郎: 平成 28 年熊本地震 の余震観測に基づくサイト増幅特性の分析、第 20 回 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウ ム講演論文集、土木学会、pp.251-256, 2017.
- 32) 川瀬博: 震源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—1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ—,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, pp. 29-34, 1998.
- 33) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *Jour. of Geo*physical Research, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 34) 野津厚,長尾毅,山田雅行:経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良―因果性を満足する地震波の生成―,土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 35) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics* and Earthquake Engineering, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002.
- 36) 吉田望,末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水 平成層地盤の地震応答解析プログラム,佐藤工業 (株)技術研究所報,pp.61-70,1996.
- 37) 例えば、秦吉弥、片岡正次郎、野津厚: 2011 年東北 地方太平洋沖地震による観測記録を用いた他地点で の地震動推定に関する精度評価、日本地震工学会論 文集, Vol.16, No.4, pp.195-214, 2016.
- 38) 中村豊,上半文昭,井上英司:1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR 地震情報,鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部,No.23d,1996.

(2017.8.29 受付)

SEISMIC WAVEFORM ESTIMATION AT TAKADA RESIDENTIAL CLUSTER IN AGANO CITY DURING THE 1995 NORTHERN NIIGATA PREFECTURE EARTHQUAKE BASED ON THE PSEUDO POINT-SOURCE MODEL

Yoshiya HATA, Fumihiro MINATO, Masaki YAMAUCHI and Yutaro OKAWA

Serious damage of residential houses was occurred at Takada Cluster in Agano City, Japan, during the 1995 Northern Niigata Prefecture Earthquake. In this study, first, temporary observations of microtremor and earthquake were conducted in the residential cluster of interest. The pseudo point-source model for the 1995 main shock was then constructed based on the similarity between the observed and the synthetic ground motions at JMA Niigata. Finally, based on the results of the both observations and the model construction, ground motions in the cluster of interest during the 1995 main shock were estimated.