

大崎市古川高密度地震観測を利用した 表層地盤構造の推定

稲谷 昌之¹・後藤 浩之²・盛川 仁³・小倉 裕美子⁴・徳江 聡⁵・
ZHANG Xin-rui⁶・岩崎 政浩⁷・荒木 正之⁸・澤田 純男⁹・Aspasia Zerva¹⁰

¹京都大学大学院工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:inatani@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³東京工業大学大学院総合理工学研究科教授 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:morika@enveng.titech.ac.jp

⁴東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:ogura.y.ab@m.titech.ac.jp

⁵東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:tokue.s.aa@m.titech.ac.jp

⁶東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

E-mail:zxr_nh@yahoo.co.jp

⁷大崎市役所防災安全課 (〒989-6188 宮城県大崎市古川七日町1番1号)

E-mail:bousai@city.osaki.miyagi.jp

⁸(株) aLab (〒151-0053 東京都渋谷区代々木1-42-10ブルックリンコート2F)

E-mail:araki@logvox.jp

⁹京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

¹⁰Drexel University, Professor (Philadelphia, PA, USA.)

E-mail: zervaa@drexel.edu

2011年東北地方太平洋沖地震では内陸部の宮城県大崎市古川地区において地震動による構造物被害が多く発生した。古川地区の中でも一部地域に被害が集中していることから、その原因の一つとして地盤震動特性の違いが考えられる。そこで、本研究では古川地区に展開されている超高密度地震観測のデータを利用して地盤震動特性の違いを検討した。古川地区内の地盤が各点毎に構造の異なる一次元水平成層構造であると仮定して地盤モデルを推定したところ、被害が集中した地域において表層地盤が厚くなる傾向が見られた。ただし、推定した地盤モデルを用いて時刻歴観測波形の再現を試みたところ、一部の観測点には再現出来ない特徴的なフェーズが認められた。このことは、表層の地盤構造を一次元水平成層構造でモデル化するという従来の枠組みでは、古川地区の地震動を説明する上で本質的に不十分であることを示唆している。

Key Words : the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Furukawa, ground motion, very dense seismic array observation, ground model

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本を中心として極めて広い範囲で大きな揺れが観測された。防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)の観測点であるK-NET築館では最大水平加速度 2765cm/s^2 を記録するなど、最大水平加速度

が 980cm/s^2 を越える記録が18地点で観測され、また2つの観測点で震度7に相当する計測震度6.5以上の地震動が観測されている。一方で、地震動によって大きな被害が見られた地域と最大水平加速度や計測震度の大きかった地域は必ずしも一致はしていない¹⁾。

本研究で対象とする宮城県大崎市古川地区は地震

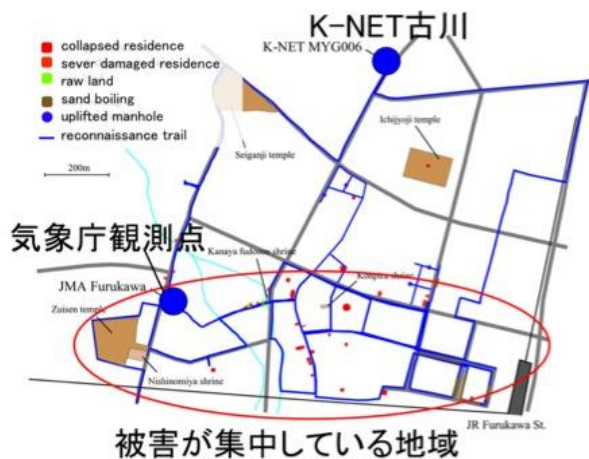


図-1 古川地区の被害状況¹⁾とK-NET及び気象庁の強震動観測点。

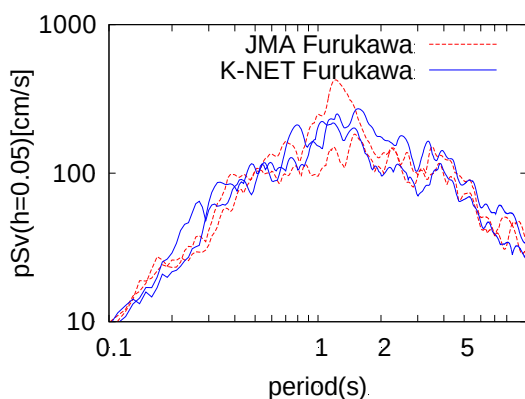


図-2 K-NET古川及び気象庁古川における本震の疑似速度応答スペクトルの水平成分の比較。

動による家屋の被害、液状化の被害が特に集中して発生した地域である¹⁾。古川地区の被害調査結果を図-1に示す¹⁾が、同地区内においても特に被害が集中している地域とそうでない地域が見られる。古川地区には常設の強震観測点が1km程離れて2点（K-NET MYG006・気象庁古川）設置されており、気象庁古川観測点は被害が集中している地域内に位置する。K-NET及び気象庁の本震記録の水平成分の疑似速度応答スペクトル（減衰5%）を図-2に示す。これらを比較すると、気象庁記録の方が周期1.0-1.5秒のレベルが高くなっていることから、古川地区の地震動特性の違いも被害状況の違いに影響した可能性が考えられる。

今回の地震のように、震源からの距離が数百km離れている場合に1.5km四方位程度の範囲に収まる地域内で震源から観測点下の基盤面までの伝播経路特性による差異は十分小さく、無視出来ると考えられる。このため、地域の地震動特性が異なる場合、地域内での浅い地盤構造の差によるものであることが予想される。しかし、古川地区全体の地盤震動特性の違いを評価するためには、2点の既設観測点のみでは



図-3 地震計の設置状況例（F07）。

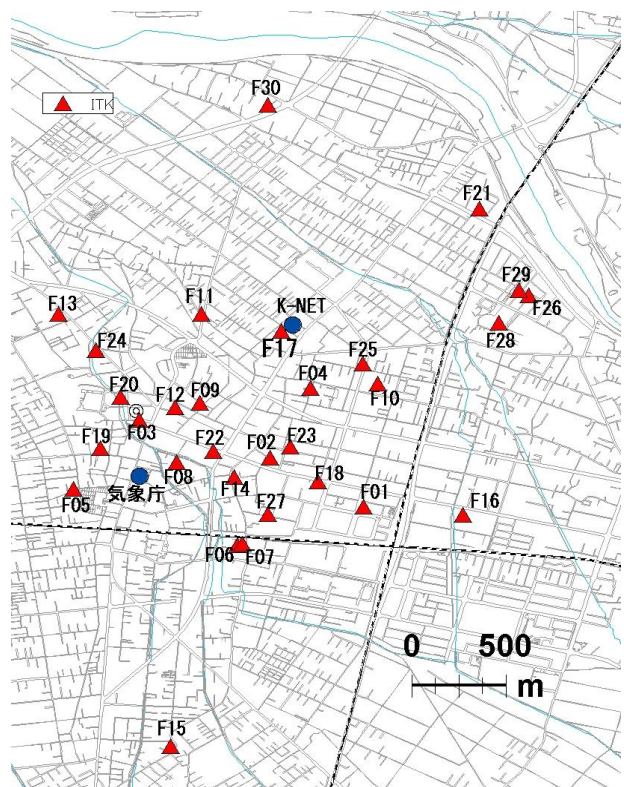


図-4 地震観測点の配置（2012年9月現在）。

不十分であると考えられる。そこで、高密度地震観測網を同地区に設置して地震動の観測を行う試みが進められている²⁾。

本研究では、古川高密度地震観測によるデータを利用して、古川地区内の表層地盤構造を推定することで地盤震動特性の違いを議論することが目的である。まず、古川高密度地震観測についてその概要を紹介し、データを利用した地盤震動特性の違いについて考察する。

2. 古川高密度地震観測

古川高密度地震観測では低コストでの実現を目指すため、安価なセンサーである IT 強震計（ITK-002）を採用している（図-3）。各センサーは電源、

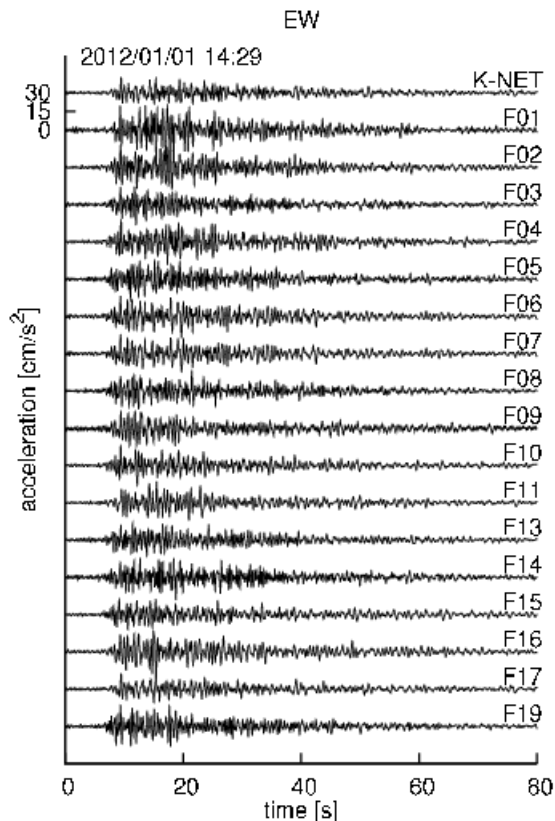


図-5 2012年1月1日の地震の加速度波形（EW成分）。

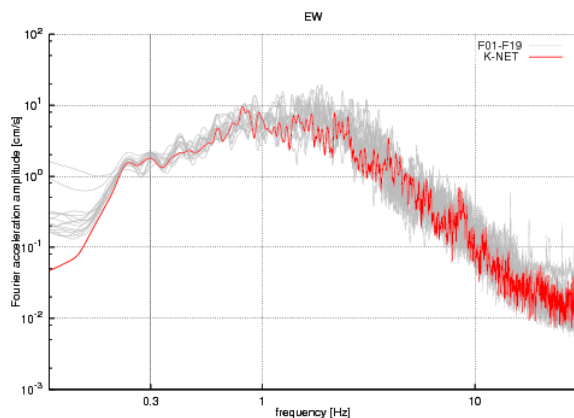


図-6 2012年1月1日の地震の加速度フーリエスペクトル（EW成分）。

及び常時接続のインターネット回線を必要とし、記録されたデータはネットワーク経由でリアルタイムにサーバーへと送信される。各地震計は屋外の軒下などのコンクリート上に設置し、石膏で固定してある。また、本来 ITK-002 は NTP で時刻同期を行う仕様であるが、異なるネットワークに属する地震計間では時刻精度が十分に保証されないため、GPS モジュールを接続し GPS による時刻補正を行っている。

以上のことから、屋外電源と常時接続回線を利用できるボランティアを大崎市役所を介して募集した。2011 年 9 月に設置作業を始めて以降、順次観測点数は増加し、2012 年 9 月現在南北およそ 3km、東西およそ 2km の範囲に 30 点の観測点が稼働している。これにより、地震計設置密度は 0.2km²/台を達成し、

横浜市高密度強震計ネットワークの 3km²/台などの他の観測網と比較しても一桁密な観測網を実現している。具体的な地震設置点の配置を図-4 に示す。観測網は被害の多かった地域と K-NET 及び気象庁観測点を含む地域をカバーしており、観測点間の距離はばらつきがあるものの概ね 200m 程度である。

2012 年 1 月 1 日に起きた鳥島沖を震源とする深発地震（Mj7.0）の観測加速度波形の東西方向成分を図-5 に、それらのフーリエスペクトルを図-6 にそれぞれ示す。加速度波形を見ると、各観測点とも全体的な包絡形状は似ているものの位相や振幅値が観測点毎にばらついていることがわかる。また、フーリエスペクトルを見ると概ね 1Hz より低周波数側では観測点ごとに大きな違いは見られないもののそれより高周波数ではばらつきが大きくなる傾向が見られる。また、0.3Hz より低周波数においては地震観測網のデータと K-NET のデータとの間で違いが出てくるが、これは地震計の特性の違いを反映しているものと考えられる。

以上のことから、各観測点において地盤震動特性が異なること、また K-NET と比較して ITK-002 は 0.3Hz より高周波数側では信頼できるデータが得られていると考えられる。

3. 古川地区の表層地盤構造の推定

(1) ボーリングデータに基づく地盤モデル

古川地区の地盤震動特性の違いを把握するために、表層地盤の地盤構造を知ることは重要である。そこで、本研究では古川地区の表層地盤モデルを推定する。

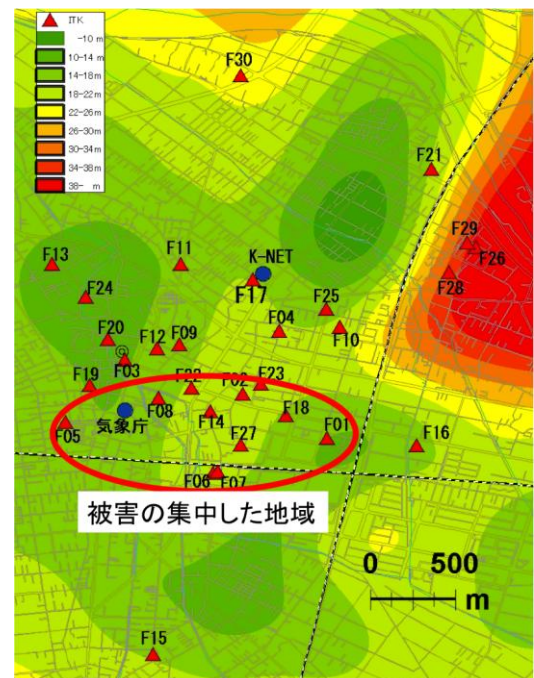


図-7 ボーリングデータに基づく地盤モデル。

始めに、ボーリングデータを利用して古川地区の

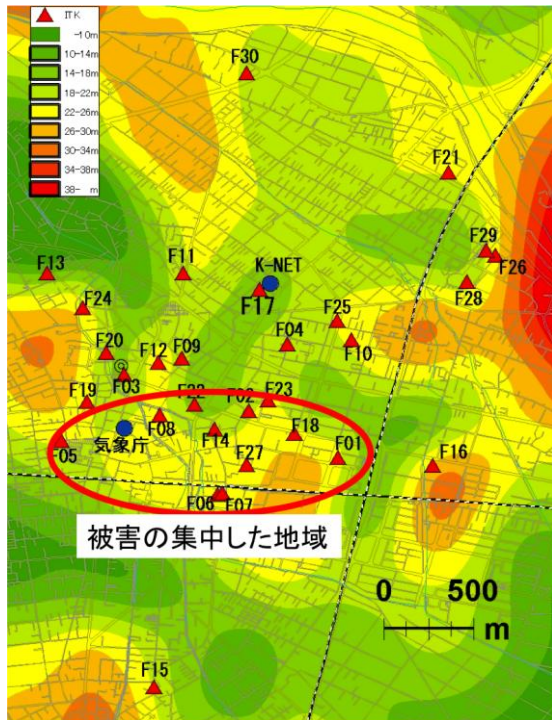


図-8 観測データから求めた地盤モデルの基盤深さ分布。

支持基盤深さ分布を求めた。使用するボーリングデータは古川土地分類調査³⁾に記載されているもので設置した観測網でカバーする地域内のもの、古川ガス跡地のボーリングデータ⁴⁾、及び K-NET 古川のボーリングデータである。礫質でかつ N 値が 50 を越えている地盤の層を支持基盤層と考えてこれらのボーリングデータから基盤深さを読み取り、それらをスプライン補間することで支持基盤深さ分布を推定した。図-7 にボーリングデータから求めた支持基盤深さの空間分布を示す。図-7 を見ると、被害が集中していた地域とそうでない地域で大きな差は見られない。一般的に表層地盤が厚い方が地震動の増幅が大きくなる傾向にあるため、このモデルでは被害と地震動特性との関係を直接議論することは難しい。

(2) 観測データを用いた地盤構造の推定

次に、高密度地震観測網で観測されたデータを用いて、観測データに適合するような地盤構造を推定する。各観測点直下の地盤構造をそれぞれ表層 2 層と基盤からなる 3 層の一次元水平成層構造であると仮定する。すなわち、1 次元水平成層構造を仮定しているが、その厚さ、材料定数などは地点によって異なるを考える。

K-NET 古川からおおよそ 65m と近距離に位置しており、同じ地盤構造であると仮定できる観測点 F17 に対するフーリエスペクトルの水平成分の比を各観測点ごとにとり、観測スペクトル比とする。また、地盤モデルを設定し、その地盤モデルから計算される伝達関数の比をモデルによるスペクトル比とする。

観測スペクトル比とモデルによるスペクトル比が 1-5Hz の範囲で一致するように遺伝的アルゴリズムで最適なモデルを探索した。モデルは各層の層厚、S 波速度、密度をパラメータとしているが、K-NET 観測点のボーリングデータと大きく変わらないように、ある程度の範囲内で探索している。図-8 に得られたモデルの基盤深さ分布を、図-9 に図-8 のモデルから計算したスペクトル比と観測スペクトル比の比較をそれぞれ示す。なお、図-9 は F08, F10 観測点についてのみ示している。観測データによる情報の有無にそれぞれ対応する図-7 と図-8 を比較すると、被害の多かった地域の基盤深さに違いが認められ、図-8 の方が深く求められている。また、モデルから計算されるスペクトル比は観測されたスペクトル比をよく表していることが分かる。

(3) 推定した地盤構造を用いた時刻歴波形の再現

推定した地盤モデルを用いて、2012 年 1 月 1 日の鳥島沖を震源とする地震の速度時刻歴波形の再現を試みた。この地震は深発であることと、規模の大きい遠方の地震であることから、実体波の鉛直下方入射が十分仮定できると考えられる。F17 観測点の時刻歴波形と地盤モデルから基盤への入射波を推定し、その入射波を各観測点直下の地盤モデルに作用させることで各観測点での時刻歴波形を計算した。

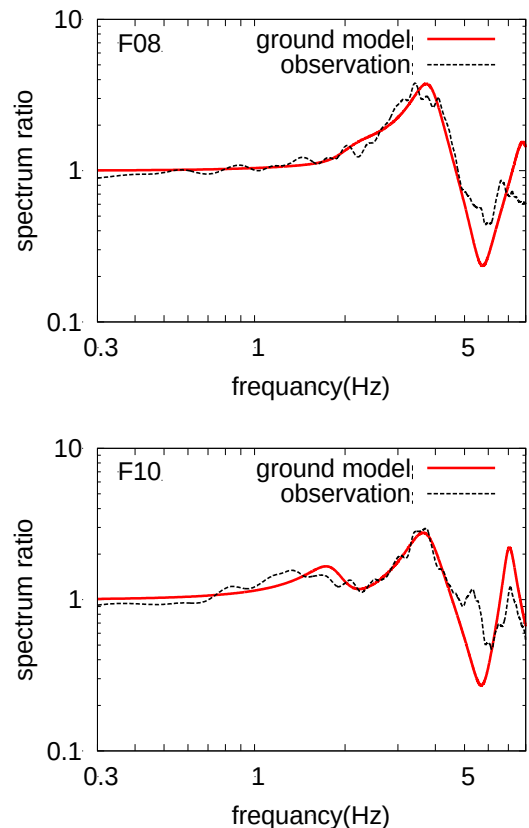


図-9 観測スペクトル比と地盤モデルから計算したスペクトル比の比較（上：F08観測点，下：F10観測点）。

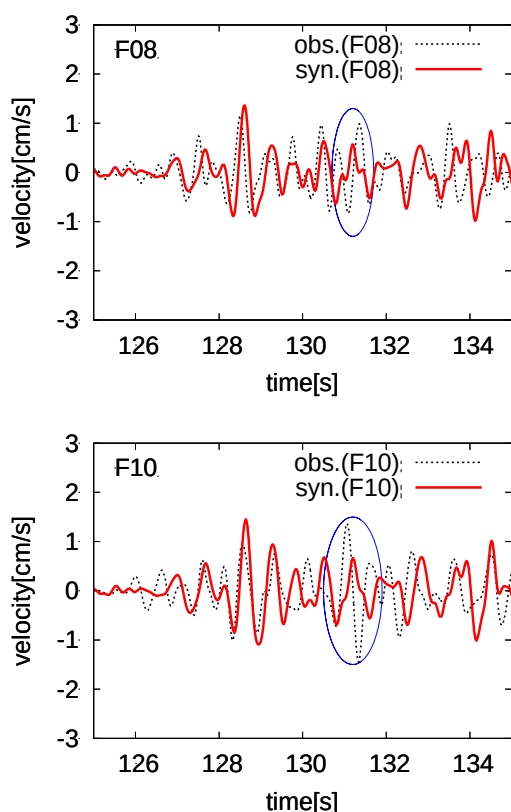


図-10 観測波形と再現波形の比較（上：F08観測点，下：F10観測点）。

観測された速度波形と地盤モデルを利用して F17 観測点の記録から求めた時刻歴波形の比較を図-10 に示す。図-10 から、各時刻歴波形に見られる S 波初動の再現性は高いものの、後続波として表れる顕著なフェーズを良く再現できていないことがわかる。F08 観測点の観測波形ではそのフェーズの振幅は S 波初動の振幅と比較して小さいものの、F10 観測点ではそのフェーズの振幅が S 波初動の振幅と同程度かやや上回っている。このことは、PGV などのように地震動の最大値を利用した議論ではこのフェーズを無視することは出来ない。

従来、表層地盤による地震動の増幅は鉛直下方から入射する S 波実体波が主要であるとして、一次元水平成層構造を仮定し、PGV などの増幅特性が議論されてきた。ここで仮定したような一次元水平成層構造による表層地盤のモデル化は、従来の表層地盤に対する評価方法を踏襲したものである。本研究の結果、古川地区の地盤震動特性のうち特に顕著な振幅をもつ後続波の振幅を一次元水平成層構造で説明

出来ないことが示されたが、このことは表層地盤のモデル化に対する従来の考え方に対して 1 つの疑問を呈していると捉えることも出来る。

6. まとめ

東北地方太平洋沖地震で大きな被害が見られた宮城県大崎市古川地区において実施されている高密度地震観測のデータを利用して、表層地盤構造を推定し、地盤震動特性について考察した。高密度地震観測は現在およそ 6km² の範囲に 30 台の地震計が稼働しており、地震計密度は 0.2km²/台とこれまでの高密度地震観測網と比べて一桁以上密な地震観測網を実現していることから、空間解像度の高い議論が出来るようになった。

古川地区の地盤構造を一次元水平成層構造を仮定し、観測された記録を用いて表層地盤構造の推定を行った。観測データに適合する地盤モデルは、東北地方太平洋沖地震で構造物被害の集中していた地域で基盤が深くなる傾向が認められた。一方、この地盤モデルを用いて時刻歴波形の再現を行ったところ、S 波初動の再現性は高いものの後続波の顕著なフェーズが良く再現出来ない。このことは、仮定した一次元水平成層構造では古川地区の地盤震動特性を十分説明できないことを示唆している。今後新しい考え方を導入して、古川地区の地盤震動特性の評価を目指していく必要があると考える。

謝辞：本研究では宮城県大崎市及び地震計設置ボランティアの方々に御協力いただきました。また、防災科学技術研究所 K-NET、および気象庁の観測記録を利用致しました。併せて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 後藤浩之：地震及び地震動の特性，土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害調査報告書，pp.4-1-4-38，2011.
- 2) Goto, H., H. Morikawa, M. Inatani, Y. Ogura, S. Tokue, X.R. Zhang, M. Iwasaki, M. Araki, S. Sawada and A. Zerva: Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seism. Res. Lett.*, 83, 765-774, 2012.
- 3) 宮城県古川市：古川市土地分類調査（細部調査）報告書 -資料編-, 1986
- 4) 日本瓦斯協会：宮城県沖地震と都市ガス，1979

Masayuki INATANI, Hiroyuki GOTO, Hitoshi MORIKAWA, Yumiko OGURA,
Satoshi TOKUE, ZHANG Xin-rui, Masahiro IWASAKI, Masayuki ARAKI,
Sumio SAWADA, Aspasia ZERVA

During 2011 Tohoku-oki earthquake, strong ground motion caused serious damage to residences at Furukawa area in Miyagi Prefecture, north eastern part of Japan. Based on the damage distribution, severe damages were concentrated in southern part of Furukawa district. The variation of damage distribution implies that the ground motion characteristics were not uniform in Furukawa district. In this study, we started to install the very dense seismic-array and observe ground motion. We assumed one-dimensional horizontally-layered structure just under the stations and estimated ground structure by using the records based on the observation. Then, we calculated velocity waveforms of the earthquake on January 1st 2012, by using the model. However, the waveforms do not agree well for the following phases, and this implies that one-dimensional horizontally-layered structure is not enough assumption to simulate the ground motion in Furukawa district.