庄内平野における地下構造推定のための微動水平上下スペクトル比とレイリー波位相速度の同時インバージョン解析
Joint Inversion of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio and Rayleigh Wave Phase Velocity for Subsurface Structure Estimation in the Shonai Plain

○山本耕平・松島信一・長嶋史明・周宇廷・ティンザーヤダナー・五熊大・按田悠・山中宏起
○Kohei YAMAMOTO・Shinichi MATSUSHIMA・Fumiaki NAGASHIMA・Yuting CHOU・
Thinzar YADANAR・Hiro ITSUKUMA・Yu ANDA・Hiroki YAMANAKA

This study investigates the relationship between the damage distribution of the 1894 Shonai earthquake and site amplification factors. Microtremor observations were conducted at 132 single-point and 19 array observation sites, and Microtremor Horizontal-to-Vertical spectral Ratio (MHVR) and Rayleigh wave phase velocity were calculated. Through joint inversion of MHVR and phase velocity, velocity structures with the common layer velocities but different thicknesses were identified at the array observations sites. The velocity structures at single-point observation sites were also identified using the same common velocities. The site amplification factors were calculated from the estimated subsurface structures, and distributions of averaged amplification factor at selected frequency bands were obtained. The regions with high amplification at 1 Hz relatively correspond to the areas with severe damage in the 1894 earthquake, suggesting relatively short-period waves amplified by the subsurface structure might significantly impact on building damage.

１．はじめに

1894 年庄内地震は庄内平野東縁断層北部を震源とした内陸地殻内地震と推定されており、その被害は水田・鏡味[1)]により史料に基づいて整理されている。文献[1)]では推定震度 7 相当の被害を受けた大字は庄内平野に広く散在しているが、その複雑な分布の要因は未だ明らかになっていない。そこで、本研究では微動観測記録に基づいて庄内平野の地下構造と地盤増幅率を推定し、被害分布との関係を考察する。

２．観測概要と観測結果

本研究では、庄内平野で 132 カ所の単点微動観測と 19 カ所の微動アレイ観測を実施した。微動アレイ観測では大アレイと小アレイを行った。単点微動観測記録からは微動水平上下スペクトル比(MHVR)を求め、MHVR のピーク振動数、ピーク振幅ともに複雑な空間分布となり、微地形分類[2)]では説明できないことが分かった。微動アレイ観測記録からはレイリー波位相速度を求めた。解析には微動アレイ解析ツール BIDO（ver.3.2）[3,4)]と Geopsy[5)]を用い、それぞれ SPAC 法と f-k 法によって、レイリー波位相速度を求めた。大アレイでは 0.5Hz 前後～20Hz まで凡そ安定した結果が得られ、小アレイでは 2Hz 前後～20Hz までの位相速度得られたが、全体的に標準偏差が大きく不安定な結果となった。

３．同時インバージョン解析

広い周波数範囲で安定した結果が得られた各大アレイで MHVR とレイリー波位相速度をターゲットとした同時インバージョンを行い、共通の層速度を求めた後に各アレイでの層厚を再度同定する。単点微動観測点での MHVR に対してもアレイ観測点で求めた共通の層速度を用い層厚を同定する。同定には HV-Inv[6)]を用いた。このとき、インバージョンの振動数範囲は MHVR で 0.6Hz～20Hz、レイリー波位相速度で 0.5Hz 前後～20Hz とした。結果の一例を図 1 に示す。概ね観測結果と合致した理論解となる地下構造を得ることができた。

４．地盤増幅率と被害分布の関係

3 章で推定した地下構造から地震基盤から地表までの地盤増幅率を DYNEQ[7)]を用いて計算し、いくつかの振動数帯での平均増幅率を推定し、スプライン補間により対象地域全域の増幅率分布を求めた。図 2 に示す 1Hz での地盤増幅率が大きい地域は文献[1)]における地震被害が大きかった地域と凡

そ一致することが分かった。このやや短周期と呼ばれる 1Hz 前後の地震動は近年の地震でも家屋に大きな被害をもたらしており、1894 年当時の家屋でも同様にやや短周期の地震動が増幅されることで大きな被害を受けた可能性があることが示唆される。

５．まとめ

本研究では、微動観測に基づいたインバージョン解析により地下構造と地盤増幅率を推定し、家屋の被害が大きかった地域は、1Hz での地盤増幅率が大きい傾向にあることを明らかにした。

謝辞

本研究では微動観測の実施にあたり、東京大学地震研究所の加納靖之准教授、大邑潤三助教、産業技術総合研究所の吾妻崇様、山形大学の石瀬素子講師のご協力を頂きました。深く御礼申し上げます。また、本研究は拠点間連携共同研究一般課題型研究の助成を受け、さらに東京大学地震研究所共同利用(2024-D-21)の援助も受けました。

参考文献

1) 水田敏彦・鏡味洋史，2013，1894.10.22 庄内地震の大字別の被害分布に関する文献調査，日本建築学会技術報告集，第 19 巻，第 43 号，1235-1238

2) 有賀友子，1984，庄内平野の地形発達―更新世末期以降の砂礫分布の変化―，東北地理，第 36 巻，第 1 号，13-24

3) Cho I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2006, J. Geophysical J. Int., 165, 236-258

4) Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, 2008, J. Geophysicals, Res., 113, B06307

5) Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M. and Savvaidis, A., 2020, Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing, Seismological Research Letters, 91(3), 1878-1889

6) García-Jerez A., Piña-Flores J., Sanchez-Sesma F., Luzon F., Perton M., 2016, A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption, Computers&Geosciences, 97, 67-78

7) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYNamic response analysis of level ground by EQuivalent linear method, Version 4.01, 2021, 関東学院大学

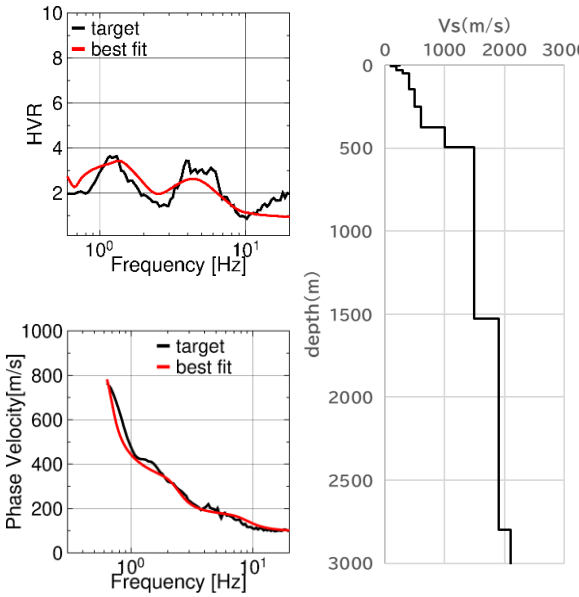

図 1 アレイ 01 における同時インバージョン結果

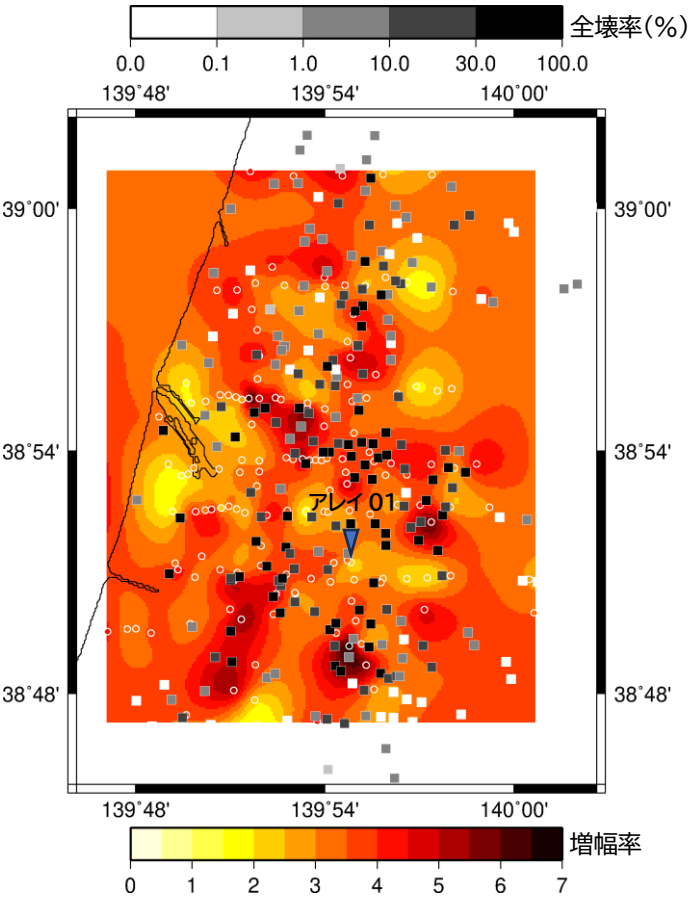

図 2 1Hz における地盤増幅率（○と背景）と家屋全壊率[1)]（□）の分布