

# 東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所鉛直アレー観測記録のNIOM解析

○茂木秀則<sup>1)</sup>・川上英二<sup>2)</sup>

- 1) 正会員 埼玉大学工学部建設工学科, さいたま市桜区下大久保 255, hmogi-2008f@kiban.civil.saitama-u.ac.jp  
 2) 正会員 埼玉大学地圏科学研究センター, さいたま市桜区下大久保 255, kaw@kiban.civil.saitama-u.ac.jp

## 1. はじめに

本研究では女川原子力発電所内の鉛直アレーにおける東北地方太平洋沖地震(2011/3/11 14:46, M9.0)とその余震(2011/4/7 23:32, M7.1)の観測記録<sup>1)</sup>についてNIOM解析を行い, 女川原子力発電所の立地する軟岩の地震波の伝播速度と剪断剛性率の変化を検討した.

## 2. NIOM解析の概要<sup>2),3)</sup>

鉛直アレーの2点の観測記録を  $f(t)$ ,  $g(t)$  とするとき, 両者は伝達関数  $H(\omega)$  ( $\omega$  は角振動数) を用いて以下のように関連づけることができる.

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

ここで,  $F(\omega)$ ,  $G(\omega)$  はそれぞれ,  $f(t)$ ,  $g(t)$  のフーリエ変換である. NIOM法は2点の観測結果から求めた  $H(\omega)$  に対して, 入力  $x(t)$  を  $x(0) = 1$  を満たす単純なパルス波形としたときの入力  $x(t)$  と出力  $y(t)$  を求める手法であり, 具体的には, 次式で与えられる.

$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{k_X}{c_X} \omega_n^2\right) (c_X + c_Y |H(\omega_n)|^2)}}$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i) \quad (2)$$

ここで,  $\Delta t$ ,  $N$  はそれぞれ, 観測記録の時間ステップとデータ数,  $c_X$ ,  $c_Y$ ,  $k_X$ ,  $k_Y$  はNIOM解析のパラメータで, 本研究では  $c_X = c_Y = 1$ ,  $k_X = k_Y = 0.00001$  とした. 最後に, 得られた  $X(\omega)$ ,  $Y(\omega)$  をフーリエ逆変換すると, 単純化された時間の関数としての入力および出力モデルが得られる. なお, 本研究では, 式(2)の入出力モデル  $X(\omega)$ ,  $Y(\omega)$  に後続の0を付加してデータ数を16倍に増やして, 観測記録の時間ステップ0.01sを1/16に補間している.

## 3. 地盤構造と鉛直アレー<sup>1)</sup>

図-1に女川原子力発電所内の鉛直アレー観測点における地盤構造を示す. 地表から5mまでが盛土, それ以深は全て砂岩である. なお, 盛土層内の伝播速度は不明である.

地震計の方向はプラントの南北(N38.9°W), 東西(N51.1°E)を基準として設置されており, 本研究でもこの成分をNS, EWと称する.

## 4. 伝播時間の検討

図-2に本震主要動の4秒間(92s~96s)のNIOM解析の結果を示す. NIOM解析を行った2つの地震計のうち, 下の観測点におけるEW, NS, UDの3成分の波形(出力モデル  $y(t)$ )をそれぞれ, 太実線, 太破線, 細実線で, また, 上の観測点におけるEW成分の波形(入力モデル  $x(t)$ )を細破線で示している. 例えば(a)

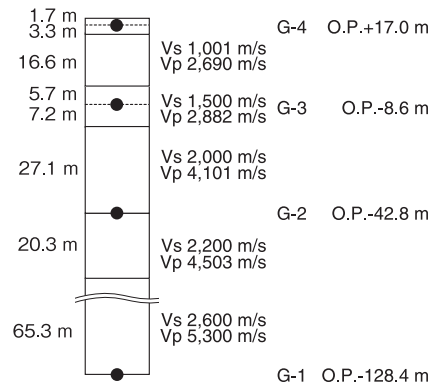


図-1 鉛直アレーにおける地盤構造<sup>1)</sup>.

G-1~G-2区間のEW成分の結果を見ると, 上の観測点G-2においてパルス波が時刻0で現れ(細破線), 下の観測点G-1では-0.032(s)に入射波が通過している(太実線)ことが読み取れる.

図-3にNIOM解析によって得られた(a)本震と(b)4/7余震における各深度区間の伝播時間を示す. 両図とも, 水平2成分はS波の到着時刻, UD成分はP波の初動を含むように, それぞれ解析の開始時刻を定め, 4s間のタイムウィンドウを2sずつ移動しながら連続的にNIOM解析を行ったものである. 図中, 0s付近にPS検層の結果<sup>1)</sup>から算定したP波とS波の伝播時間を, また, 余震のコーダ部(100s~180s)のNIOM解析による伝播時間の平均値を各図の右部分に示している. なお, この平均値は3つの深度区間ともにPS検層の結果<sup>1)</sup>から推定される伝播時間よりも小さい値であった.

図-3をみると, 本震と余震ともに, どの層においても速度振幅の増加とともに伝播時間が増加していることがわかる. 特に地表近くのG-3~G-4区間においてより顕著である. なお, G-3~G-4区間のNS成分はばらつきが大きくなっているが, これは図-2(c)にみるように, NS成分のNIOM波形が双峰形となる傾向があるためである. この原因としては地表面付近で生じる反射波や散乱波などの影響が現れているものと考えられる. また, G-1~G-2区間とG-3~G-4区間では伝播速度の偏向異方性が見られ, NS成分がEW成分よりも伝播速度が小さいという結果が得られた.

UD成分のNIOM解析から得られる伝播時間はP波速度を反映したものである<sup>3)</sup>. 図-3のUD成分の伝播時間の変化(図中3本の細線)をみると, 各区間のP波の伝播時間も速度振幅の増加とともに増加していることがわかる.

## 5. 剪断剛性率の検討<sup>4)</sup>

NIOM解析に基づく伝播時間(EW成分)から推定した剪断剛性率と剪断ひずみの関係を図-4に示す. なお, 盛土層のS波速度が不明であり, この値がG-3~G-4区間の結果に大きく影響するため, 検討はG-1~

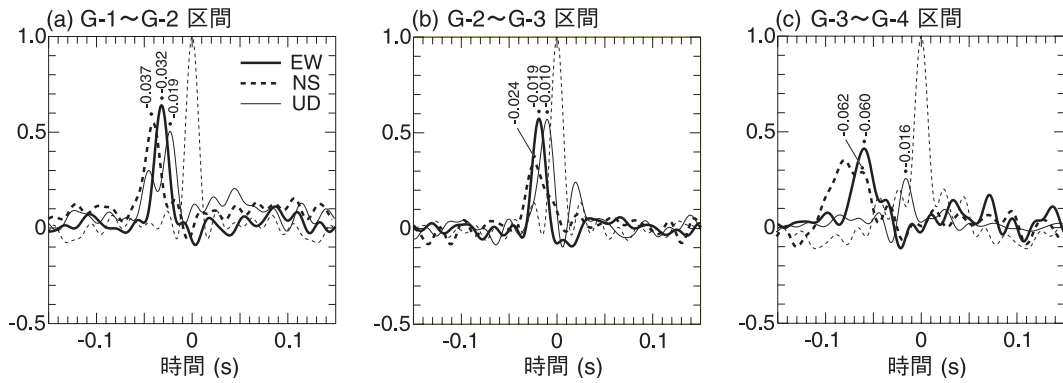


図-2 (a)~(c) 本震主要動 (92 s~96 s) の NIOM 解析結果. 太実線, 太破線, 細実線がそれぞれ, EW 成分, NS 成分, UD 成分の出力モデルの波形, 細破線が EW 成分の入力モデルの波形を示す.

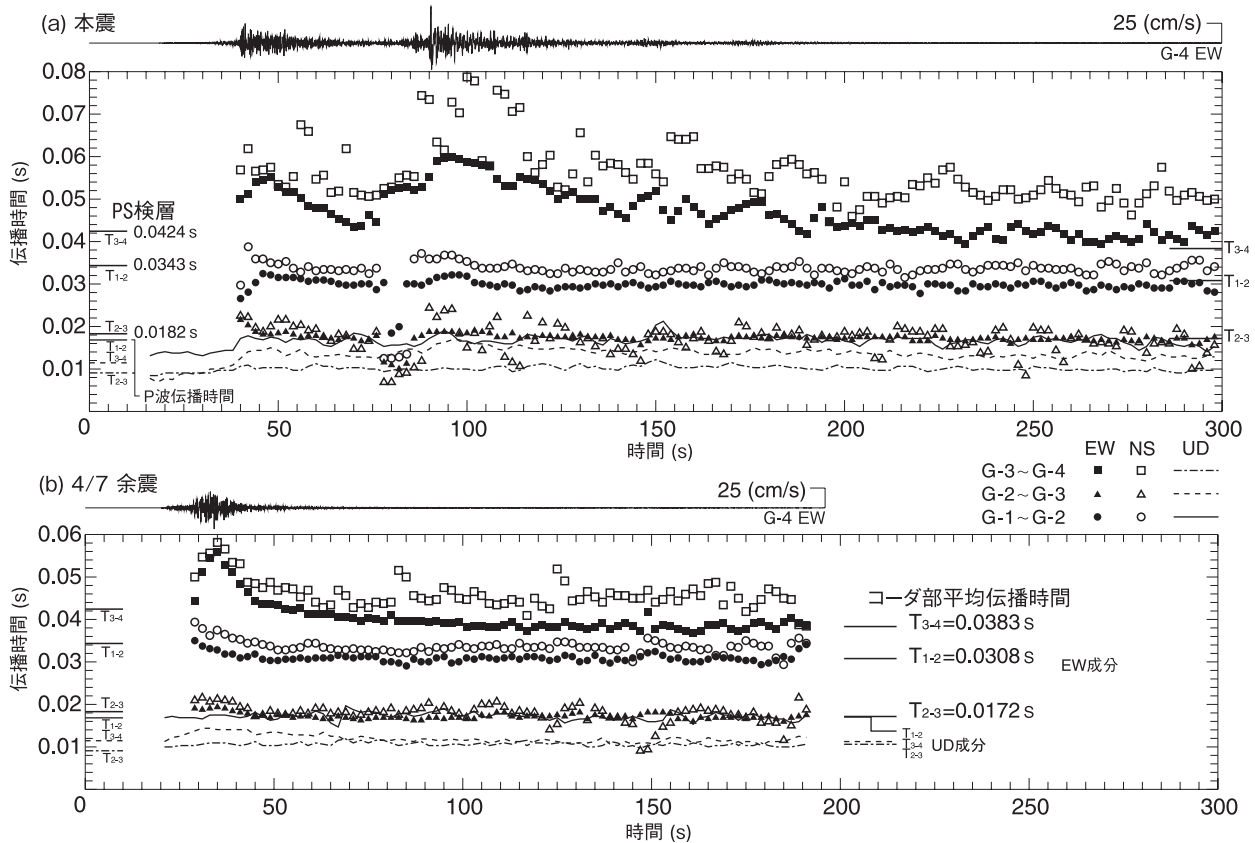


図-3 NIOM 解析による (a) 本震と (b) 4/7 余震における伝播時間の経時変化. ●▲■が EW 成分, ○△□が NS 成分, 折線が UD 成分の解析結果を示す. PS 検層結果<sup>1)</sup>に基づく各層内の伝播時間, および, 余震コーダ部の NIOM 解析による伝播時間の平均値を横線で示している. それぞれの図上部の波形は G-4 観測点における EW 成分の速度波形である.

G-2, G-2~G-3 の 2 区間で行った.

図-4 を見るように, どちらの区間も著しい剪断剛性率の低下は見られない. 剪断剛性率の低下が比較的

明瞭に読み取れる G-2~G-3 区間においても, 最大剪断ひずみは  $5 \times 10^{-4}$  程度, 剪断剛性率の減少率は 15~20% である. また, 本震と余震でほぼ一致したカーブを示していることもわかる.

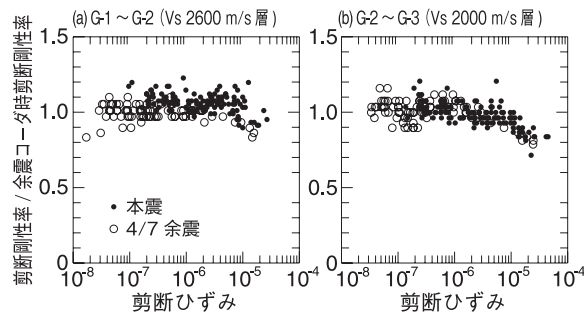


図-4 余震コーダ時の平均 Vs から求めた剪断剛性率で正規化した剪断剛性率. (a) G-1~G-2 (Vs 2600 m/s 層), (b) G-2~G-3 (Vs 2000 m/s 層). どちらも EW 成分の結果.

謝辞 本研究では,「東北電力株式会社女川原子力発電所における「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ」に収録された観測記録を使わせて頂いた. 関係各位に深謝の意を表す. 文献 1) 東北電力株式会社: 東北電力株式会社女川原子力発電所における「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ, 2011.7. 2) Kawakami, H. and Haddadi, H. R.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), *Soil Dyn. Earthq. Engng.*, 17, pp.117-126, 1998. 3) Haddadi, H. R. and Kawakami, H.: Effect of liquefaction on ground motion during the Hyogoken-nanbu earthquake, 1995, in Japan by using NIOM method, *The Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, 2, pp.1015-1022, 1998. 4) 茂木, Shrestha, S. M., 川上, 川村: KiK-net 一関西観測記録から推定した岩手・宮城内陸地震とその前後の S 波伝播時間の経時変化と地盤の非線形挙動, *日本地震工学会論文集*, 9, 5, pp.44-56, 2009.