



女川原子力発電所における東北地方太平洋沖地震前後の 地震波の伝播速度の変化

茂木秀則¹⁾、川上英二²⁾

1) 正会員 埼玉大学工学部建設工学科、准教授 博士（工学）

e-mail : hmogi-2008f@kiban.civil.saitama-u.ac.jp

2) 正会員 埼玉大学地圈科学研究センター、教授 工博

e-mail : kaw@kiban.civil.saitama-u.ac.jp

要 約

東北電力株式会社女川原子力発電所は東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日14:46、M9.0）の震源の近くに位置しており、発電所内の各観測点において多くの貴重な強震記録が得られた。本研究では、東北電力株式会社女川原子力発電所内の鉛直アレーにおける観測記録を用いて NIOM 解析を行い、東北地方太平洋沖地震とその前後の地震波の伝播時間の経時変化と地盤物性の変化を調べた。その結果、(1) G-1～G-2 区間 (G.L.-147.1～-61.5 m) では、東北地方太平洋沖地震の本震主要動部分において最大剪断歪は 5×10^{-5} 程度、剪断剛性率 G/G_0 は 0.8～0.9 程度であり、S 波の伝播時間の変化はわずかであったこと、(2) 一方、G-3～G-4 区間 (G.L.-27.3～-1.7 m) では、東北地方太平洋沖地震の本震主要動部において最大剪断歪は 1×10^{-3} に達し、剪断剛性率 G/G_0 は 0.3～0.4 程度まで低下したものと考えられることなどを指摘した。

キーワード： 2011年東北地方太平洋沖地震、女川原子力発電所、鉛直アレー、NIOM法
伝播時間、経時変化、非線形挙動

1. はじめに

東北電力株式会社女川原子力発電所は東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日14:46、M9.0）の震源の近くに位置しており、地盤に設置された鉛直アレーを含め、発電所内の各観測点において多くの強震記録が得られた¹⁾。原子力発電所のような重要構造物では地震計が密に配置されており、防災科学技術研究所による K-NET や KiK-net などの観測記録が広く公開されている現在においても、得られた観測記録は地震波の伝播や構造物の地震応答を論じる上できわめて貴重なものである。

鉛直アレー観測記録を用いて地盤の非線形化を論じる手法として、一次元重複反射理論を逆解析に用いる手法が適用されることが多く、例えば、Satoh ら²⁾ や時松ら³⁾ などでは上記の手法で得られた、強震時の剪断剛性率と減衰比が主に論じられている。

一方、川上らは鉛直アレー観測記録から直接、地震波の伝播時間を精度良く推定する方法として SIORM 法⁴⁾ や NIOM 法^{5)～7)} を展開し、様々なアレー観測記録に適用してその有効性を示している。また、1995 年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録に NIOM 法を適用した結果から、液状化

層を挟む上下の地震記録の相関性が液状化によって著しく減少すること、本震のコーダ部に含まれる余震の解析から S 波速度の低下が検出されることなどを指摘している⁸⁾。さらに、2007 年新潟県中越沖地震における東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーの観測記録や 2008 年岩手・宮城内陸地震における防災科学技術研究所 KiK-net 一関西観測点における鉛直アレー観測記録とそれぞれの余震記録に NIOM 法を適用して、強震動中の地盤剛性の低下とその後の回復過程を時間軸上で詳しく論じている^{9),10)}。

本研究では女川原子力発電所内の鉛直アレーにおける観測記録を用いて NIOM 解析を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震とその前後の地震波の伝播時間の経時変化を求めるとともに、剪断剛性率 G/G_0 の変化を調べた。

2. 解析手法とデータ

2.1 NIOM 解析の概要

本節では、NIOM 法⁵⁾⁻⁷⁾ の概要を示す。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 $H(\omega)$ (ω 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。

$$G(\omega_i) = H(\omega_i)F(\omega_i), \quad (i = 0, \dots, N - 1) \quad (1)$$

ここで、 $H(\omega)$ は 2 点間の伝達関数であり、2 点の観測記録 $f(t)$ 、 $g(t)$ の離散フーリエ変換 $F(\omega_i)$ 、 $G(\omega_i)$ から $H(\omega_i) = G(\omega_i)/F(\omega_i)$ より求められる。なお、 $F(\omega_i)$ 、 $G(\omega_i)$ は観測記録から FFT を用いて求めるが、その際、スムージングやはぎ取り解析などの付加的な処理は一切行っていない。また、地震やタイムウインドウごとの伝播時間を検討するのが本解析の目的であるため、着目するそれぞれの地震やタイムウインドウにおける波形を用いて $F(\omega_i)$ と $G(\omega_i)$ を算出しなければならない。

NIOM 法は 2 点の観測結果から求めた $H(\omega)$ に対して、 $x(0) = 1$ を満たし、かつ単純なパルス波形としたときの入力モデル $x(t)$ と出力モデル $y(t)$ を求める手法であり、このための条件として

$$L = \sum_{i=0}^{N-1} \left[c_X |X(\omega_i)|^2 + k_X \omega_i^2 |X(\omega_i)|^2 + c_Y |Y(\omega_i)|^2 + k_Y \omega_i^2 |Y(\omega_i)|^2 \right] - \lambda \left\{ \frac{1}{N \Delta t} \sum_{i=0}^{N-1} X(\omega_i) - 1 \right\} \quad (2)$$

を最小にすることを考える。ここで、 λ はラグランジエの未定定数、 c_X 、 c_Y はそれぞれ、入力モデル $x(t)$ と出力モデル $y(t)$ に対する重み係数、また、 k_X 、 k_Y はこれらの時間微分 $dx(t)/dt$ 、 $dy(t)/dt$ に対する重み係数である。なお、重み係数の決定には任意性がある。本研究では、入力モデルと出力モデルを同程度に単純化するものとし、これらに対する重み係数である c_X 、 c_Y はともに 1 に設定した。さらに、モデルの波形とそれを時間で微分した波形との重み係数の比についても入力モデルと出力モデルに対して等しいものとし、次式の関係を設定した。

$$\frac{k_X}{c_X} = \frac{k_Y}{c_Y} \quad (3)$$

この場合、重み係数としては k_X だけを与える必要があるが、 k_X はモデル波形の時間微分に対する重み係数であるため、 k_X を増加させるとよりなめらかな入出力モデルの波形が得られる。本研究では、後述のように $k_X = 0.00001 \text{ s}^2$ とした。これは得られるモデル波形を見比べて、明瞭なピークが得られるように試行錯誤的に定めたものであるが、この値は出力モデル波形のピークを与える時刻にはほとんど影響しないため、NIOM 解析の最終的な結果である伝播時間がこの値によって大きく影響されることはない。

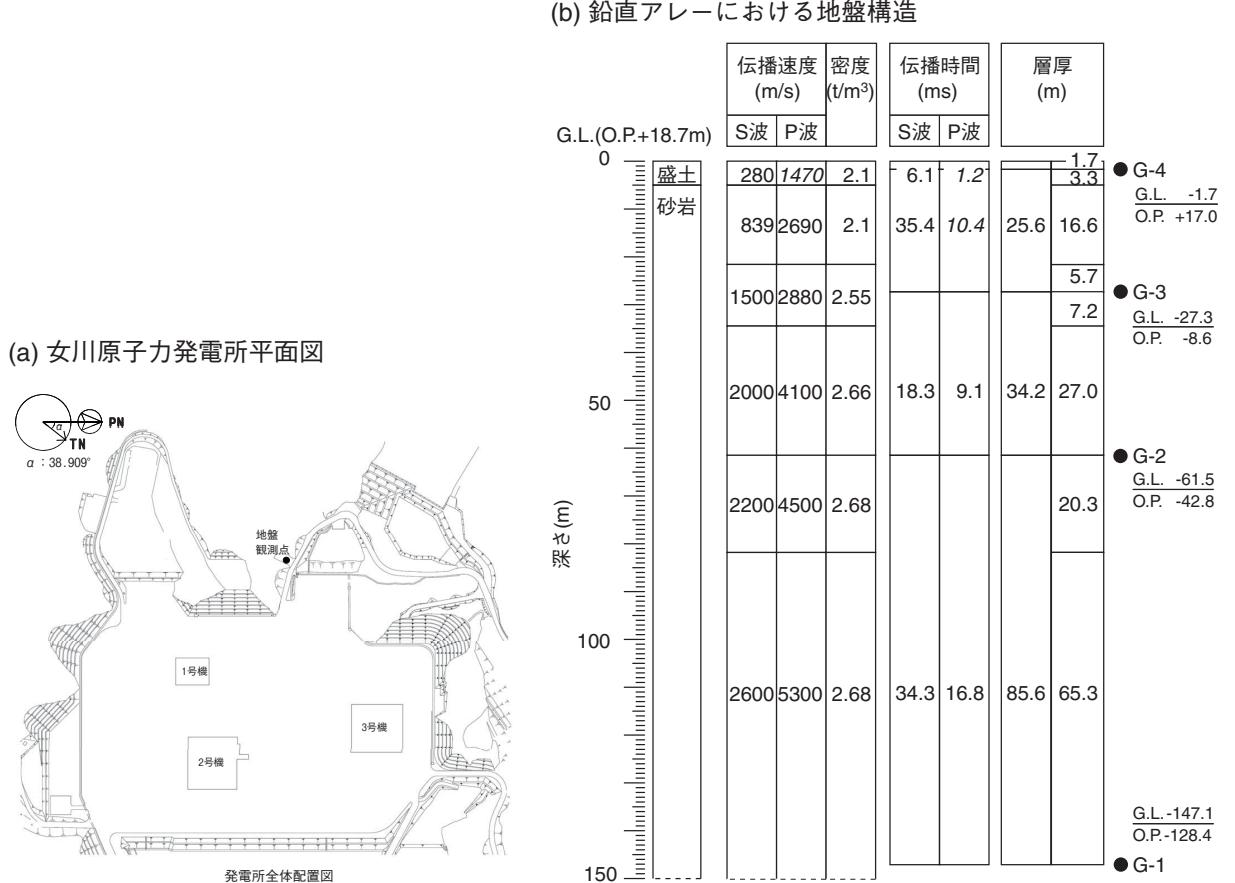


図 1 (a) 女川原子力発電所平面図¹⁾。本研究で用いた鉛直アレーは図中の地盤観測点に位置する。TN、PN はそれぞれ真北、プラントノースを表す。(b) 鉛直アレーにおける地盤構造^{1),11)} とそれに基づく地震波の伝播時間。O.P. は女川原子力発電所工事用基準面 (O.P.=T.P.-0.74 m)。

この条件から得られる、入力モデル $x(t)$ と出力モデル $y(t)$ のフーリエ変換の最適解は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 X(\omega_i) &= N \Delta t \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{k_X}{c_X} \omega_n^2\right) (c_X + c_Y |H(\omega_n)|^2)}} \\
 Y(\omega_i) &= H(\omega_i)X(\omega_i)
 \end{aligned} \tag{4}$$

ここで、 Δt 、 N はそれぞれ、観測記録の時間ステップとデータ数である。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モデル波形および出力モデル波形が得られる。

なお、上記のように、入力モデル波形は仮想的な単位振幅のパルス波形であり、NIOM 解析で得られる入出力モデル波形は、例えば加速度波形と考えてもよいし、変位波形と考えてもよい。本論文では特に次元を定めずに、無次元の量として扱うものとする。

2.2 女川原子力発電所鉛直アレーにおける地盤構造と観測記録^{1),11)}

図 1(a) に女川原子力発電所の平面図を示す。図中の「地盤観測点」に鉛直アレーが設置されている。この地点は敷地の山側に位置しており、地表付近の地盤の不整形性が比較的強いものと考えられる。地震計

は PN (プラントノース) とその直交方向に向けて設置されているが、本研究では NS、EW 方向に変換してから解析を行っている。

図 1(b) は東北電力による鉛直アレー地点の地盤データ^{1),11)} をまとめたもので、G-1～G-4 が加速度計の位置を示す。図 1(b) に示す伝播速度は主に観測記録 CD-ROM 内の文献 1 によるものであるが、この資料には盛土層の S 波速度が与えられていないため、文献 11 に従い盛土層の S 波速度を 280 m/s とともに、これに併せて砂岩層の最上層の S 波速度もこの文献に従って 839 m/s とした。図 1(b) の密度は文献 11 によるものである。柱状図から明らかなように、鉛直アレーは表層の盛土層を除いて硬質な砂岩からなる地盤に位置しており、良好な地盤条件と考えられる。

本研究で解析を行った計 266 地震の震源を図 2 に示す。また、付録表 1 に震源の諸元表を示す。図中、東北地方太平洋沖地震本震 (2011 3/11 14:46, M9.0)、3 月 9 日前震 (11:45, M7.3)、女川原子力発電所における最大余震 (2011 4/7 23:32, M7.2・以降単に最大余震と称する) を赤で、女川原子力発電所の位置を▲で示している。また、図中の断層面は鈴木らによる本震の断層面¹³⁾ で、図の下部にこの断層面に直交する垂直面に投影した震源の深さ分布を示している。この図から、女川原子力発電所は断層面下縁のほぼ直上に位置していることがわかる。

なお、観測記録 CD-ROM 内の地震動の時刻はトリガー時刻（秒未満切り捨て）で整理されている（表 1 中 T/G）が、記録の実際の開始時刻は 20 s のプレトリガーを引いた時刻となる¹⁴⁾。本研究で用いた解析結果の時刻は上記の記録の開始時刻にタイムウインドウの開始時間（記録の始点からの経過時間・表 1 中 T/W）を加えたものである。

2.3 NIOM 解析のパラメータ

NIOM 解析は、本震と 4/7 23:32 の最大余震に対しては 4 s 幅のタイムウインドウを用い、2 s ずつ移動させながら連続的に解析を行った。また、それ以外の地震に対してはタイムウインドウの幅を 10 s とし、G-4 の加速度記録の最大振幅の時刻をタイムウインドウの前半部分に含めるようにして波形を切り出して解析を行った。また、上記のタイムウインドウの両端は 0.25 s 間で切り落とすコサインテーパーとしている。NIOM 解析に用いた式(2) 中のパラメータは $c_X = c_Y = 1$ 、 $k_X = k_Y = 0.00001 \text{ s}^2$ とした。

観測記録の時間ステップは 0.01 s であるが、NIOM 解析の式(4) で得られた入出力モデル $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ に後続の 0 を付加してデータ数を 32 倍に増やしてからフーリエ逆変換することで、得られる入出力モデル波形の時間ステップを元の時間ステップの 1/32 に補間した。

3. 解析結果

3.1 NIOM 解析による入出力モデル波形の例

図 3、図 4 に東北地方太平洋沖地震本震の EW 成分と NS 成分の波形と NIOM 解析から得られた入出力モデルの例を示す。波形は上から G-4 観測点～G-1 観測点における加速度波形である。また、上下隣り合う二つの波形を用いて NIOM 解析を行った結果の例をそれぞれの解析に用いた波形の間に示している。

東北地方太平洋沖地震は震源の規模が大きく、破壊継続時間が約 150 秒間とされる¹⁵⁾ が、加速度波形を見ると地震動の振幅レベルの時間変化はそれよりも短い時間スケールで生じていることがわかる。本研究はこのような刻一刻と変化する振幅レベルに対する地盤の非線形挙動を検討することを目的とするため、ある程度短いタイムウインドウを用いて解析することが望ましい。その一方で、NIOM 解析が基礎とするフーリエ解析の安定性も考慮する必要がある。すなわち、安定した結果を得たいならタイムウインドウを長く、急な変化を得たいなら短くする必要がある。本研究では、本震記録ならびに 4/7 の最大余震については、NIOM 解析を S 波の到着から記録の最後まで、4 s 間のタイムウインドウを 2 s ずつ移動させながら連続的に解析を行うこととした。なお、4 s 間のタイムウインドウでなければならないという訳ではなく、数秒のタイムウインドウならば同様の結果が得られることはいうまでもない。図 3、図 4 には紙面の都合から

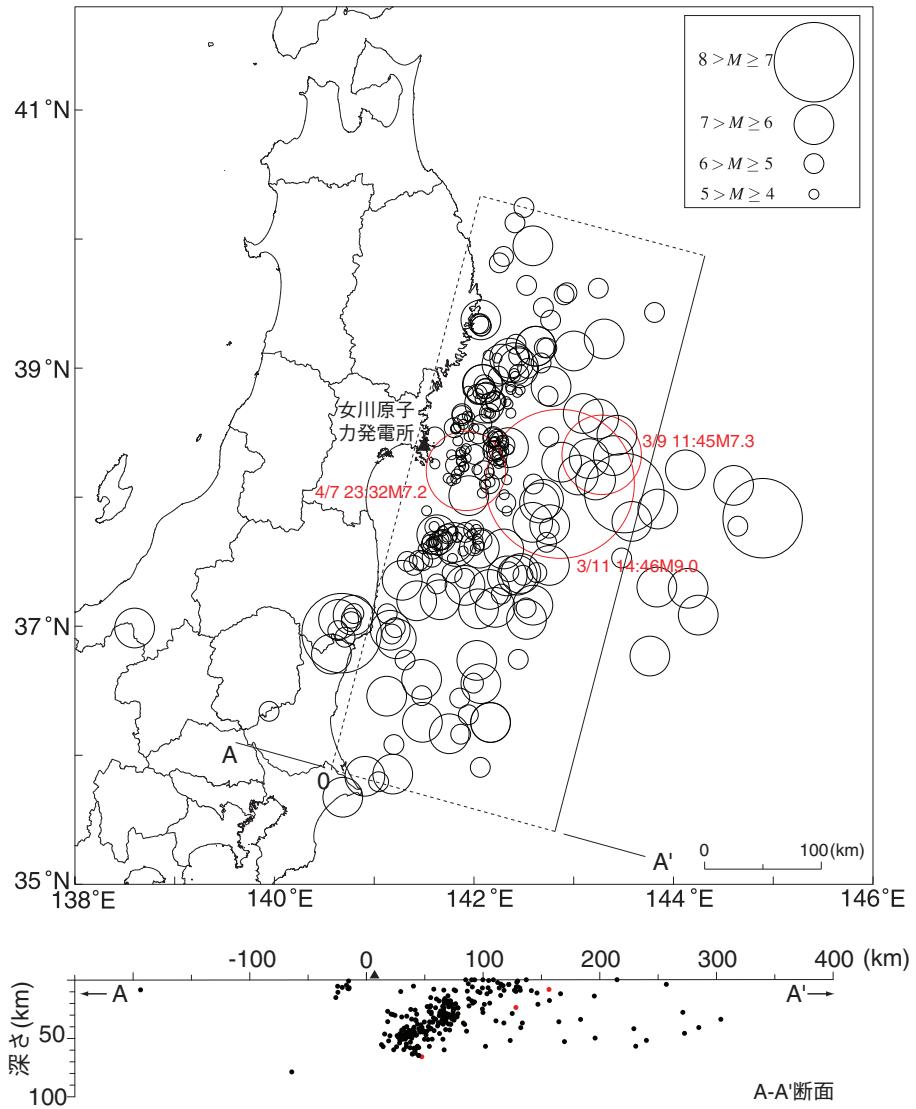


図2 解析を行った地震の震源分布

38~42 s、68~72 s、88~92 s、198~202 s、268~272 s の 5 つのタイムウインドウにおける解析結果だけを示している。図中、破線が入力モデル（上の観測点の波形を単純化したもの）、実線が出力モデル（下の観測点の波形を単純化したもの）、図中の黒点と数値は伝播時間を読み取ったピークとその通過時間を示す。また、図の上部には解析に用いた 4 s 間のタイムウインドウの位置を示している。

図3 の 38~42 s のタイムウインドウにおける G-3~G-4 区間の結果 (EW 成分) を見ると、上方の G-4 観測点に時刻 0 で単純なパルス波形が現れ（図中、破線）、このパルス波が下方の G-3 観測点を -0.0500 s に通過したことが読み取れる。従ってこのタイムウインドウにおいては、下方の G-3 観測点 (G.L.-27.3 m) から上の G-4 観測点 (G.L.-1.7 m) まで S 波が伝播するのにおよそ 0.05 s を要したことがわかる。なお、観測記録の時間ステップが 0.01 s、また、NIOM 解析において時間ステップを 1/32 に内挿しているため、NIOM 解析から読み取れる伝播時間は 0.0003125 s 間隔となる。このため、読み取った伝播時間が -0.0500 s である場合、その前後の値は -0.0497 s、-0.0503 s となる。このようにほぼ 3 刻みになる小数点以下第 4 位の数字について本論文では小さいフォントで表記している。

地中の記録の解析結果（図3 (EW 成分)、図4 (NS 成分) の G-1~G-2 区間、G-2~G-3 区間）に着目すると、出力モデルには明瞭なピークが見られるが、これは地中の記録であるため、外乱が少なく 2 点間の相

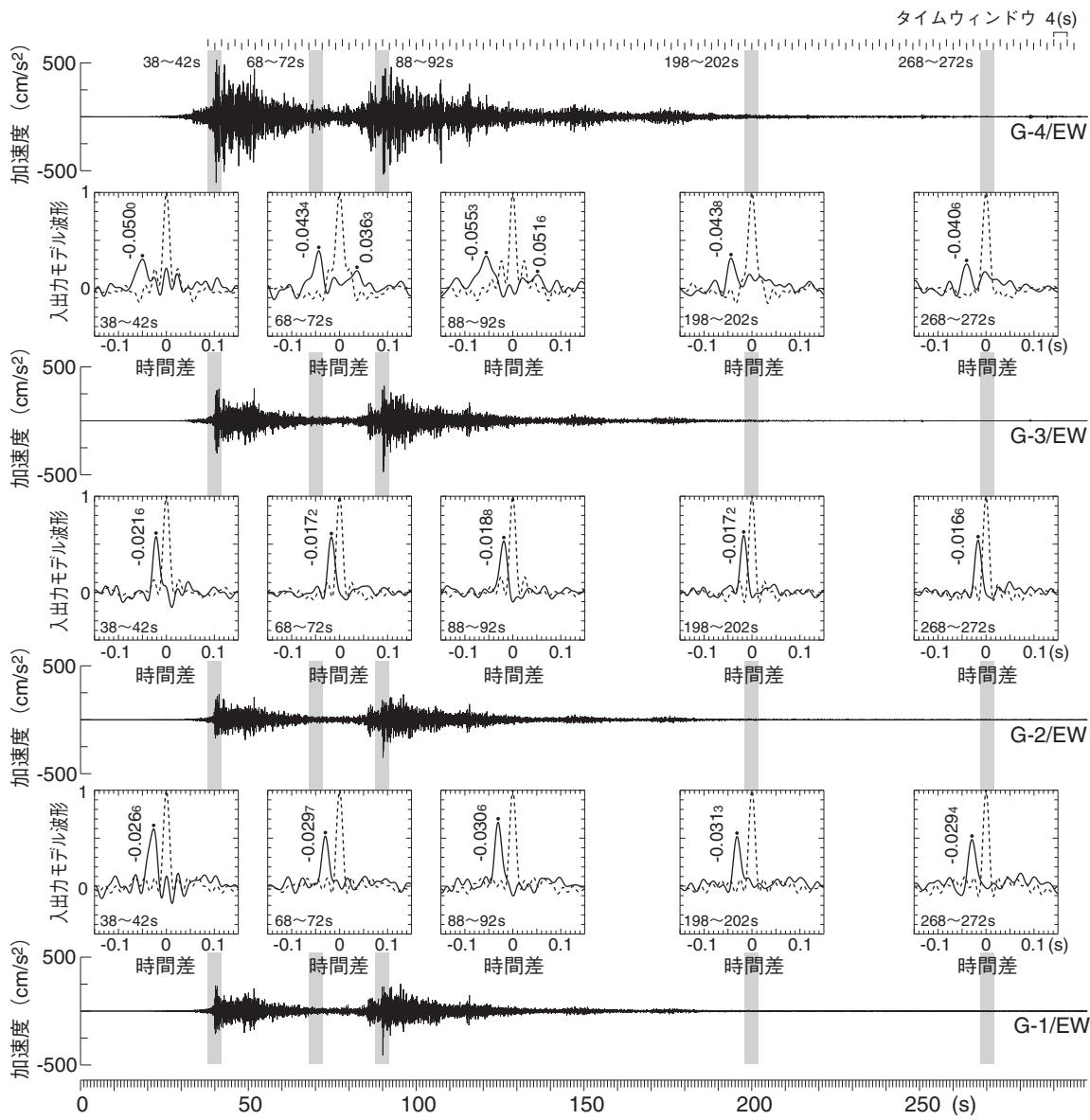


図3 東北地方太平洋沖地震本震 EW 成分の波形と NIOM 解析から得られた入出力モデルの例。上から G-4 観測点～G-1 観測点における加速度波形を示す。また、上下隣り合う二つの波形を用いて NIOM 解析を行った結果の例を、それぞれ用いた波形の間に示している。図中、破線が入力モデル（上の観測点の波形を単純化したもの）、実線が出力モデル（下の観測点の波形を単純化したもの）、図中の黒点と数値は伝播時間を読み取ったピークとその通過時間を示す。また、図の上には解析に用いた 4 s 間のタイムウインドウを示す。

関が高いためである。一方、地表近くの G-3～G-4 区間の結果ではピークの振幅が比較的小さく、複数の小さいピークが見られる。これらのピークのうち EW 成分の 68～72 s、88～92 s の解析では 0.0363 s、0.0516 s に地表面からの反射波と考えられるピークが見られるが、他のタイムウインドウや NS 成分では明瞭な反射波は検出されていない。このように地表面の反射波が不明瞭となる原因として、地表面における減衰や散乱の影響が考えられるが、具体的な原因を特定するには至っていない。また、NS 成分の G-3～G-4 区間における 38～42 s、68～72 s、88～92 s では S 波の直接波のピークの直前にも小さなピークが見られ（図4 中赤丸）、幅の広い-0.050 s 付近の明瞭なピークと合わせて幅の広いピークになっている。この小ピークに対応する波動成分が具体的にどのようなものであるかは特定できないが、ごく地表付近で生じる反射波や散

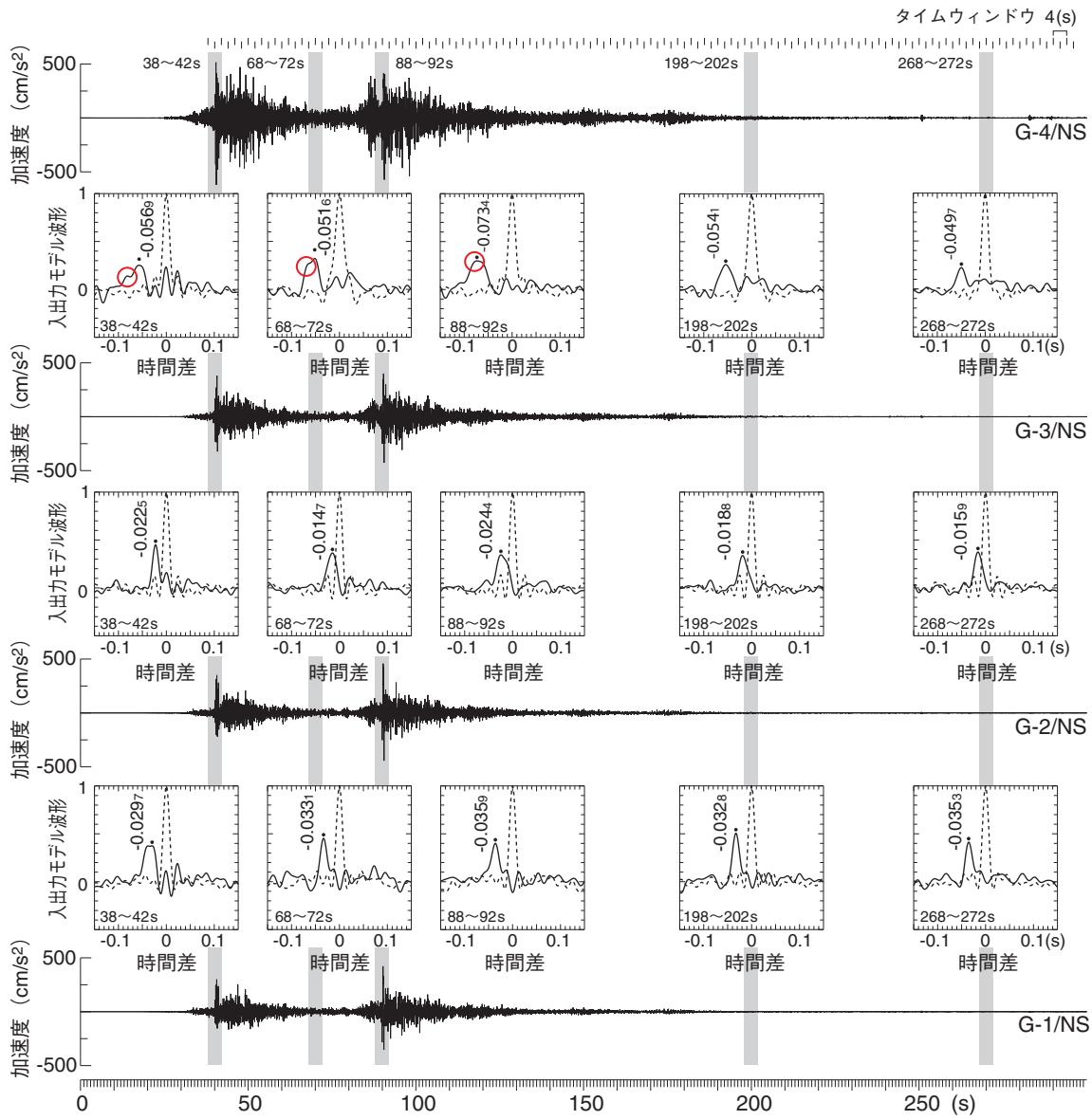


図4 東北地方太平洋沖地震本震 NS 成分の波形と NIOM 解析から得られた入出力モデルの例。図の配置は図3と同様

乱波であると考えている。また、G-3～G-4区間の結果にはEW、NS両成分とも時間差0付近にもピークが見られるとともに、その周囲も値が大きくなっている。これは、鉛直方向の見かけの伝播速度の大きい、斜め方向に伝播する波動や表面波による震動の影響と考えられる。

出力モデル波形のピーク時間の推移を見ると、最も深く伝播速度の大きいG-1～G-2区間では3成分とも変化がごくわずかであるのに対して、地表付近のG-3～G-4区間では本震主要動における伝播時間が大きく、コーダ部では伝播時間が短くなる傾向が読み取れる。このことから、女川原子力発電所においてはごく浅い層に強震動による非線形挙動が生じたものと考えられる。

図5は2011年9月15日17時1分の余震($M6.3$ 、深さ50.9km、震央距離238km)におけるG-3、G-4観測点の加速度波形とNIOM解析の結果を示したものである。ここでは、タイムウィンドウを10s間とし、12～22s、22～32s、32～42s、42～52sの4通りで行った。この地震は震央距離が大きいためにコーダ部の振幅が大きく、散乱波や表面波による振幅の占める割合が大きいものと考えられる。一方、最大加速度は

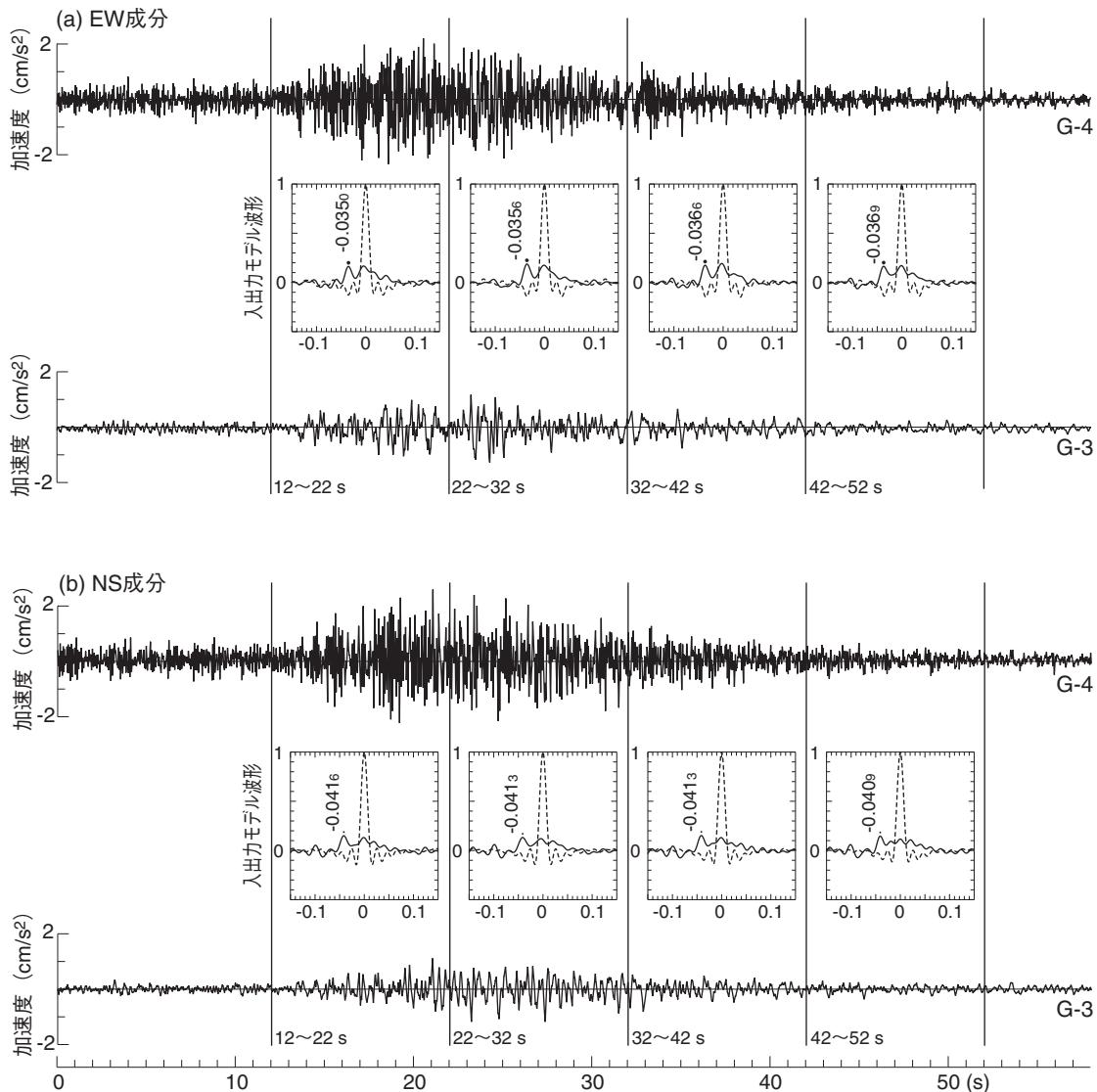


図 5 2011 年 9 月 15 日 17 時 1 分余震 ($M=6.3$ 、深さ 50.9 km、震央距離 238 km) における G-3、G-4 観測点の加速度波形と 12~22 s、22~32 s、32~42 s、42~52 s の 4 つのタイムウィンドウにおける NIOM 解析の結果

2 cm/s² 程度であり、地盤が顕著な非線形挙動を示すことはないと考えられる。

NIOM 解析の結果を見ると、S 波部分の立ち上がりを含む 12~22 s のタイムウィンドウにおける結果には、当然 S 波の伝播時間に対応するピーク (EW 成分 -0.0350s、NS 成分 -0.0416s) が見られるが、S 波主要動の後半部分 (22~32 s) やそれ以降のコーダ部分においてもほぼ同様の時刻に明瞭なピークが検出されている。このことから、コーダ部においても、ほぼ鉛直方向に伝播する S 波が地震動に含まれることがわかる。一方、東北地方太平洋沖地震本震の G-3~G-4 区間の解析結果と同様に、時刻 0 付近にもピークが見られ、このピークを与える波動成分は、鉛直方向の見かけの伝播速度がきわめて大きい斜め方向に伝播する波動や表面波であることが推察できる。このように鉛直方向の伝播速度が互いに異なる複数の波動成分は、NIOM 解析によって分離されて検出されるため、解析結果を注意深く検討することで散乱波などの影響を受けずに波動の伝播時間を調べることが可能である。なお、振動レベルの小さい地震動に対しては非線形挙動の影響が小さいため、強震動において経時変化を検討する際のように、NIOM 解析のタイムウィンドウを短く設定する必要がない。そこで、本研究ではフーリエ解析の安定性を考慮し、4/7 の最大余

震を除いて、余震の解析には S 波の初動を含む 10 s のタイムウインドウを用いて解析を行った。

一方、直接 S 波が斜め入射する場合には見かけの伝播速度が大きくなるため、完全な鉛直入射の場合と比べて伝播時間が小さく評価される。試みに、図 1 に示した層構造の下に基盤層として S 波速度 3,000 m/s の半無限層を加えた平行成層構造を考え、基盤層から平面 S 波を入射角 30°、45°、60° で入射させた場合の伝播時間を探ると、鉛直入射の場合に比較して、G-3～G-4 区間でそれぞれ、0.9%、1.9%、2.8%、また、G-1～G-2 区間では、それぞれ、9%、19%、31% 程度小さい値として評価される。本研究では入射角に関する補正を一切行わずに NIOM 解析から得られた伝播時間をそのまま示しており、示された伝播時間は上記の程度の誤差を含みうるものである。今後、入射角や観測点周囲の伝播特性の評価を行い、本観測記録における伝播時間との相関性を再検討したい。なお、余震の震源位置が発生時期に依存せずにほぼ一定の範囲にばらついているものと考えると、次節で示す伝播時間の経時変化における変化量については入射角の影響は無視できるものと考えられる。

3.2 伝播時間の経時変化

図 3～図 5 で述べた本震やその前後の伝播時間の変化をより詳しく見るために、解析を行ったすべての地震について、得られた各深度区間の伝播時間をそれぞれ、図 6～図 8 に時間の経過順に示す。図中の破線は図 1 に示した S 波の伝播時間、実線は東北地方太平洋沖地震からおよそ 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録（2011 6/11 7:36～2011 10/31 8:08）における伝播時間の平均値を示す。また、各図の下には、NIOM 解析を行ったタイムウインドウごとの地震動の強さの指標として、各深度区間の上方の観測点における記録から求めたタイムウインドウ内の速度振幅の RMS 値を示している。速度波形の算定に際しては、すべての観測記録に対して同一条件でかつ安定した波形を得るために、0.3 Hz から 0.2 Hz の間にかけて低振動数成分を漸次遮断するチェビシェフフィルタ¹⁶⁾ を施した後に数値積分を行っている。

図 6 の G-1～G-2 区間における本震の結果を見ると、主要動部分では若干の伝播時間の増加が見られるものの、主要動の直後からすぐに減少しており、直後の余震では本震 3 ヶ月後の余震における平均値とほぼ同じ値を示している。G-1～G-2 区間は硬質な砂岩で構成されており、大きな拘束圧と相まって強震動による非線形化が生じにくいうことがわかる。この傾向は、図 7 の G-2～G-3 区間においても同様に認められるが、この深度区間は地震計の間隔が短いために、地盤の非線形挙動による伝播速度の低下に伴う伝播時間の増加量が少ないことを考慮する必要がある。

なお、東北地方太平洋沖地震の前震（2011 3/9 11:45、M7.3）とその余震については計 8 地震と数が少なく、また、G-1～G-2 区間の伝播時間（図 6）において NS 成分にばらつきが見られ、その一方で、EW 成分ではばらつきは小さいもののほかの地震に比べて小さい伝播時間を示している。このため、本研究では非線形時の物性の評価の基準とする「通常」の伝播時間として、これらの地震の結果ではなく、本震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における伝播時間の平均値（図中実線）を用いることとした。また、G-1～G-2 区間では EW 成分と NS 成分の伝播時間の違いが認められる。このような伝播速度の偏向異方性についてその理由を特定することは現状では困難であるが、柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーの解析でも同様の偏向異方性が検出されており⁹⁾、特異な現象というわけではないようである。

一方、図 8 に示す G-3～G-4 区間の水平動成分の結果では、東北地方太平洋沖地震の本震や 4/7 23:32 の最大余震において伝播時間の顕著な増加が見られる。特に本震では 1 cm/s 以上の速度 RMS 値が 1 分以上続いている、最大振幅後の伝播時間の減少は緩やかである。さらに、本震直後の余震においても伝播時間の変化が明瞭に見られ、本震後 3～4 日間をかけて通常の状態に回復したことがわかる。これに対して、4/7 23:32 の最大余震では主要動後の伝播時間の減少が比較的急速であるとともに、その直後の余震においても伝播時間はほぼ「通常」の値を示しており、最大余震による非線形化の影響はあまり残っていないようである。

なお、G-3～G-4 区間においても、EW 成分と NS 成分とで伝播速度の偏向異方性が見られるが、これは特に本震の解析結果では前述のように出力モデル波形が双峰の形状を示すことが多いためである。

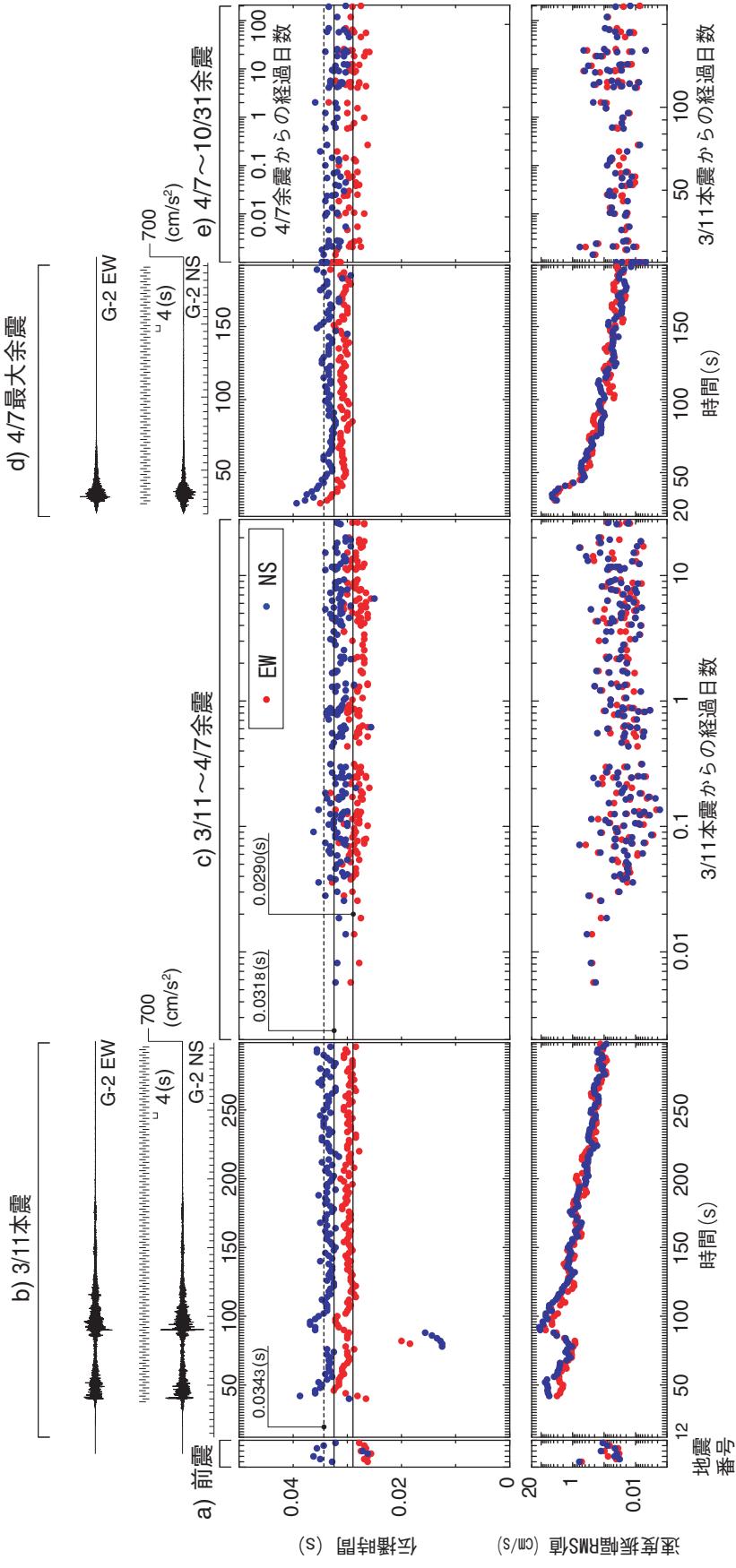


図 6 G-1～G-2 区間における東北地方太平洋沖地震とその前後の伝播時間の経時変化とタイムウインドウごとの速度振幅 RMS 値。図中、a) 2011 3/9 11:45 前震とその余震、b) 東北地方太平洋沖地震における経時変化、c) 余震 (~2011 4/7 23:32 M7.1 余震 4/7 23:36～2011 10/31 8:08) の結果を示す。上図の破線は図 1 に示した伝播時間、実線は本震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における NIOOM 解析結果の平均値を示す。

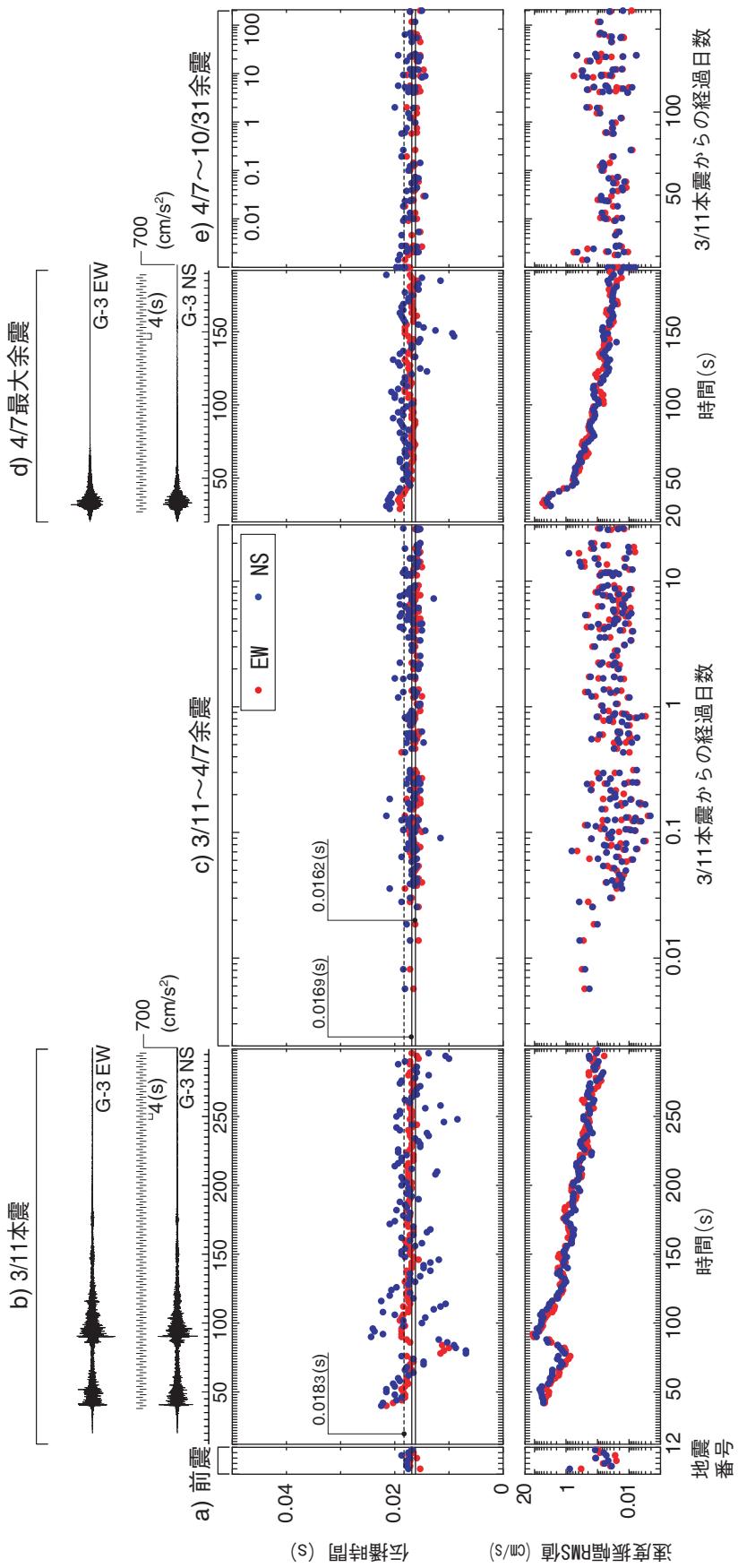


図 7 G-2～G-3 区間ににおける東北地方太平洋沖地震とその前後の伝播時間の経時変化とタイムワインドウごとの速度振幅 RMS 値。図中、a) 2011 3/9 11:45 前震とその余震、b) 東北地方太平洋沖地震における経時変化、c) 余震 (~2011 4/7 23:32 M7.1 余震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における NIOM 解析結果 4/7 23:36～2011 10/31 8:08) の結果を示す。上図の破線は図 1 に示した伝播時間、実線は本震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における NIOM 解析結果の平均値を示す。

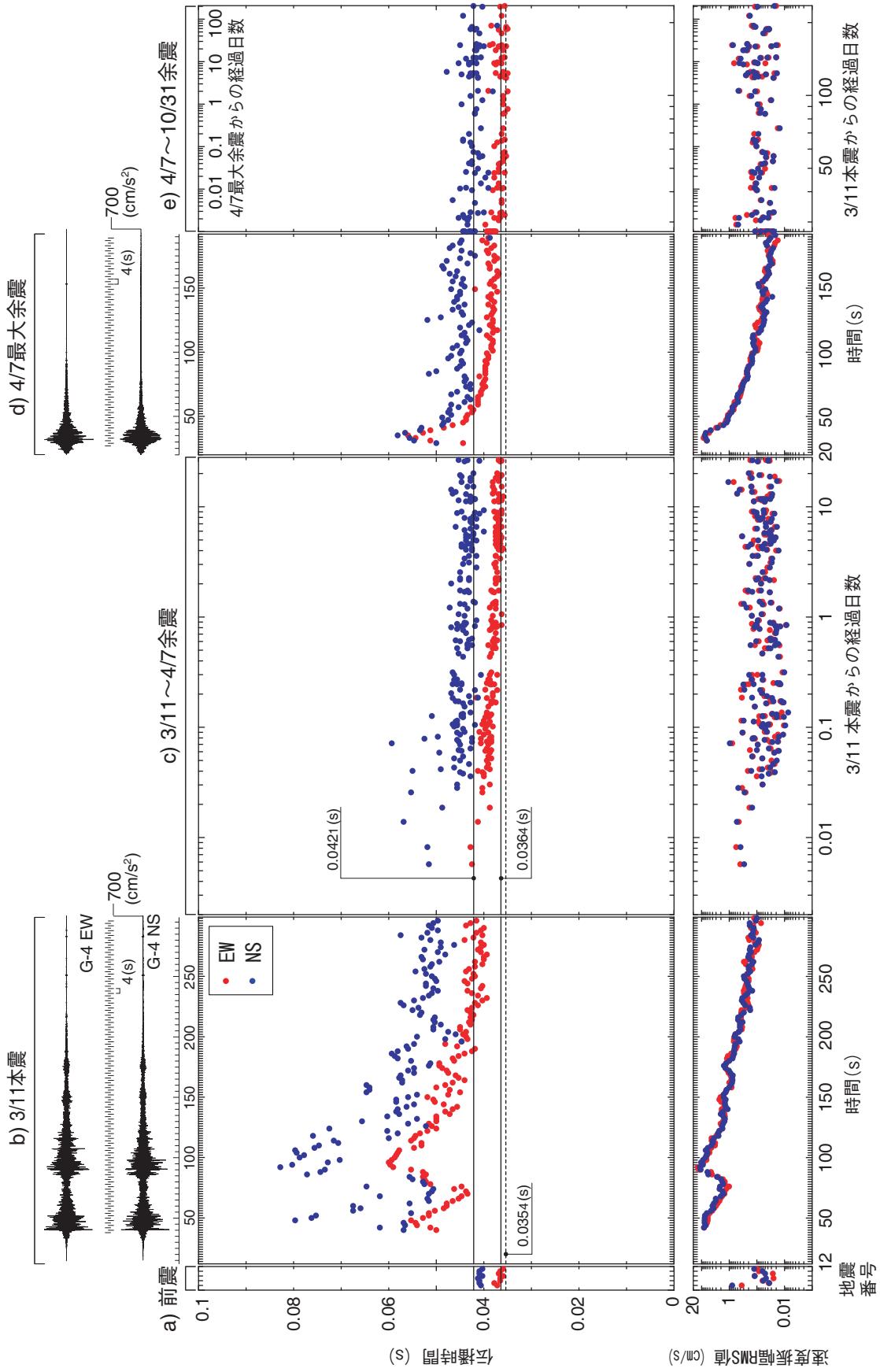


図 8 G-3～G-4 区間ににおける東北地方太平洋沖地震とその前後の伝播時間の経時変化とタイムウインドウごとの速度振幅 RMS 値. 図中、左から a) 2011 3/9 11:45 前震とその余震、b) 東北地方太平洋沖地震本震における経時変化、c) 余震 (~2011 4/7 23:32 M7.1 余震における経時変化、d) 2011 4/7 1:25、e) 余震 (2011 4/7 23:36～2011 10/31 8:08) の結果を示す。上図の破線は図 1 に示した伝播時間、実線は本震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における NIOM 解析結果の平均値を示す。

4. 非線形挙動に伴う地盤物性の変化

4.1 地盤物性の推定方法

地盤の非線形挙動は、微小歪における剪断剛性率 G_0 で正規化された剪断剛性率 G/G_0 を剪断歪 ε との関係で論じるのが一般的である。そこで、本節では NIOM 解析によって得られた伝播時間に基づいて $\varepsilon \sim G/G_0$ の関係を検討した。

図 6~8 に見るように、地盤調査に基づく弾性波の伝播時間と NIOM 解析から求められる地震波の伝播時間が正確に一致するわけではない。そこで、同一深度区間に属する複数の層の伝播速度を同じ割合で変化させることで両者の伝播時間を整合させることとした。まず、東北地方太平洋沖地震から 3 ヶ月以降に発生した余震における伝播時間の平均値を上記の G_0 に相当する基準値と見なし、この状態の S 波速度 V_S を S 波に対する補正係数 α を用いて次のように算定した。

$$V_S = V_{S0} \alpha, \quad \alpha = T_{S0}/\bar{T}_{h\text{NIOM}} \quad (5)$$

ここで V_{S0} 、 T_{S0} はそれぞれ、図 1 に示される地盤調査に基づく S 波の伝播速度とその層が属する深度区間の伝播時間である。また、 $\bar{T}_{h\text{NIOM}}$ は NIOM 解析による東北地方太平洋沖地震から 3 ヶ月以降の 40 個の余震記録における水平成分の伝播時間の平均値（図 6~8 中の実線）である。

同様の考え方に基づいて、NIOM 解析のタイムウインドウごとの S 波速度 V'_S を次式で算定した。

$$V'_S = V_S \beta = V_{S0} \alpha \beta, \quad \beta = \bar{T}_{h\text{NIOM}}/T_{h\text{NIOM}} \quad (6)$$

ここで、 β は S 波速度に対する地盤の非線形化の影響を表す補正係数、また、 $T_{h\text{NIOM}}$ は NIOM 解析で得られたタイムウインドウごとの水平成分の伝播時間である。水平 2 成分において、深度区間によって偏向異方性が見られるため、EW 成分と NS 成分を別に求めている。

たとえば G-3~G-4 区間の第 1 層の EW 成分について上記の計算すると、地盤調査に基づく S 波速度が $V_{S0}=280 \text{ m/s}$ 、 $T_{S0}=0.0354 \text{ s}$ （図 1 参照）であるのに対し、本震後 3 ヶ月以降の余震における伝播時間の平均値は $\bar{T}_{h\text{NIOM}}=0.0364 \text{ s}$ （図 4c 参照）であるため、 $\alpha = 0.973$ 、「通常の状態」の S 波速度が $V_S=270 \text{ m/s}$ と算定される。また、本震主要動における最大の伝播時間が $T_{h\text{NIOM}}=0.0594 \text{ s}$ （タイムウインドウ 96~100s）であることから、 $\beta = 0.613$ より、このタイムウインドウにおける S 波速度が $V'_S=170 \text{ m/s}$ と算定される。

上記の手順で求めたタイムウインドウごとの S 波速度 V'_S を用い、密度 ρ を不变とすると、剪断剛性率 G/G_0 を次式で算定することができる。

$$G/G_0 = \frac{\rho V'^2}{\rho V_S^2} = \beta^2 \quad (7)$$

なお、ここでは詳細な情報が不明のため、地震前後で密度の変化がないものと仮定した。ただし、文献 1 には地盤変状の記述もないことから、たとえ密度の変化が生じたとしても、S 波速度の変化と比べて小さく、無視しうるものと考えられる。

また、剪断歪は速度振幅の RMS 値 V_{RMS} を用いて、一次元的な波動伝播を仮定した簡易式¹⁷⁾を参考に、次式によって推定した。

$$\bar{\varepsilon} = V_{\text{RMS}}/V'_S \quad (8)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}$ は各タイムウインドウにおける平均的な剪断歪の値である。なお、本研究では V_{RMS} の値として、各深度区間の上方の観測点における速度振幅の RMS 値を用いた。

4.2 剪断歪と剪断剛性率

図 9(a)-(f) に各深度区間における剪断歪と剪断剛性率 G/G_0 の関係を示す。上から、G-1～G-2 区間、G-2～G-3 区間、G-3～G-4 区間の結果を示し、左側の図が各区間の本震と余震における剪断歪と剪断剛性率のすべての結果である。図中、本震のタイムウインドウごとの結果を塗りつぶした記号で、余震の結果を白抜きの記号で示している。また、右側の図は本震の結果のみを抜き出し、EW 成分の結果について直線で結んで、時間の推移に伴う変化を示したものである。図中、代表的なタイムウインドウとして第 1 破壊の最大振幅 (40 s)、第 2 破壊の最大振幅 (90 s) とその前後の計 6 つのタイムウインドウの結果について、○で囲んで示している。各区間の剪断歪は、G-1～G-2 区間では S 波速度 2,600 m/s の層、G-2～G-3 区間では 2,000 m/s の層、G-3～G-4 区間では 280 m/s の層を対象として算定したものである。

図 9(a)(b) の G-1～G-2 区間の結果を見ると、本震における剪断歪は最大で 5×10^{-5} 程度であり、このとき、 G/G_0 は 0.8～0.9 程度まで低下したことがわかる (S 波速度が数%程度低下)。また、主要動 (40 s, 90 s) の後、振幅の減少に伴って G/G_0 は上昇し、ほぼ 1 まで回復していることがわかる。一方、G-2～G-3 区間の剪断剛性率の低下 (図 9c,d) は G-1～G-2 区間よりも大きく、0.6 程度まで低下したことがわかる。なお、この区間では比較的大きな伝播速度に対して地震計の間隔が小さいために、量子化誤差が目立っており、また結果のばらつきも大きくなっていることに注意を要する。

一方、図 9(e)(f) の G-3～G-4 区間の剪断歪と剪断剛性率では、本震における最大剪断歪が 1×10^{-3} に達しており、 G/G_0 は 0.3～0.4 程度まで低下したことがわかる。主要動の直後から、地震動の振幅の減少に伴って G/G_0 は剪断歪の対数値に対して直線的に上昇し、0.8～0.9 程度まで回復している。図 8(c)において述べたように、本震後 3～4 日後に通常の伝播時間に戻っているが、これに対応して、本震後およそ 6 ヶ月間の余震記録から算定された G/G_0 の値はほぼ 1 を中心にばらついた分布を示していることが確認できる。

5. 結論

本研究では、東北電力株式会社女川原子力発電所内の鉛直アレーにおける観測記録について NIOM 解析を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震とその前震、2011 10/31 8:08までの余震の計 266 地震について、地震波の伝播時間と地盤物性の変化を検討した。以下に得られた知見を列举する。

1. G-1～G-2 区間 (G.L.-147.1～-61.5 m) では、東北地方太平洋沖地震の本震の主要動部分においても S 波の伝播時間の変化は小さく、最大剪断歪は 5×10^{-5} 程度、このときの剪断剛性率 G/G_0 は 0.8～0.9 程度であった。また、本震直後の伝播速度の回復も速やかであった。
2. 一方、G-2～G-3 区間 (G.L.-61.5～-27.3 m) では、本震の主要動部分において剪断剛性率 G/G_0 が 0.6 程度まで低下したものと考えられる。
3. G-3～G-4 区間 (G.L.-27.3～-1.7 m) では、東北地方太平洋沖地震の本震や女川原子力発電所における最大余震 (4/7 23:32, M7.2) において伝播時間の顕著な増加が見られた。安定した結果の得られた EW 成分において、本震から 3 ヶ月以降に発生した余震における平均値 0.0364 s に対して、本震主要動における最大の伝播時間は 0.0594 s、求められた最大剪断歪と剪断剛性率 G/G_0 はそれぞれ、 1×10^{-3} 、0.3～0.4 程度であった。
4. G-3～G-4 区間においては、本震直後の余震においても伝播時間の明瞭な増加が見られ、本震後 3～4 日間をかけて通常の状態に回復したことがわかった。

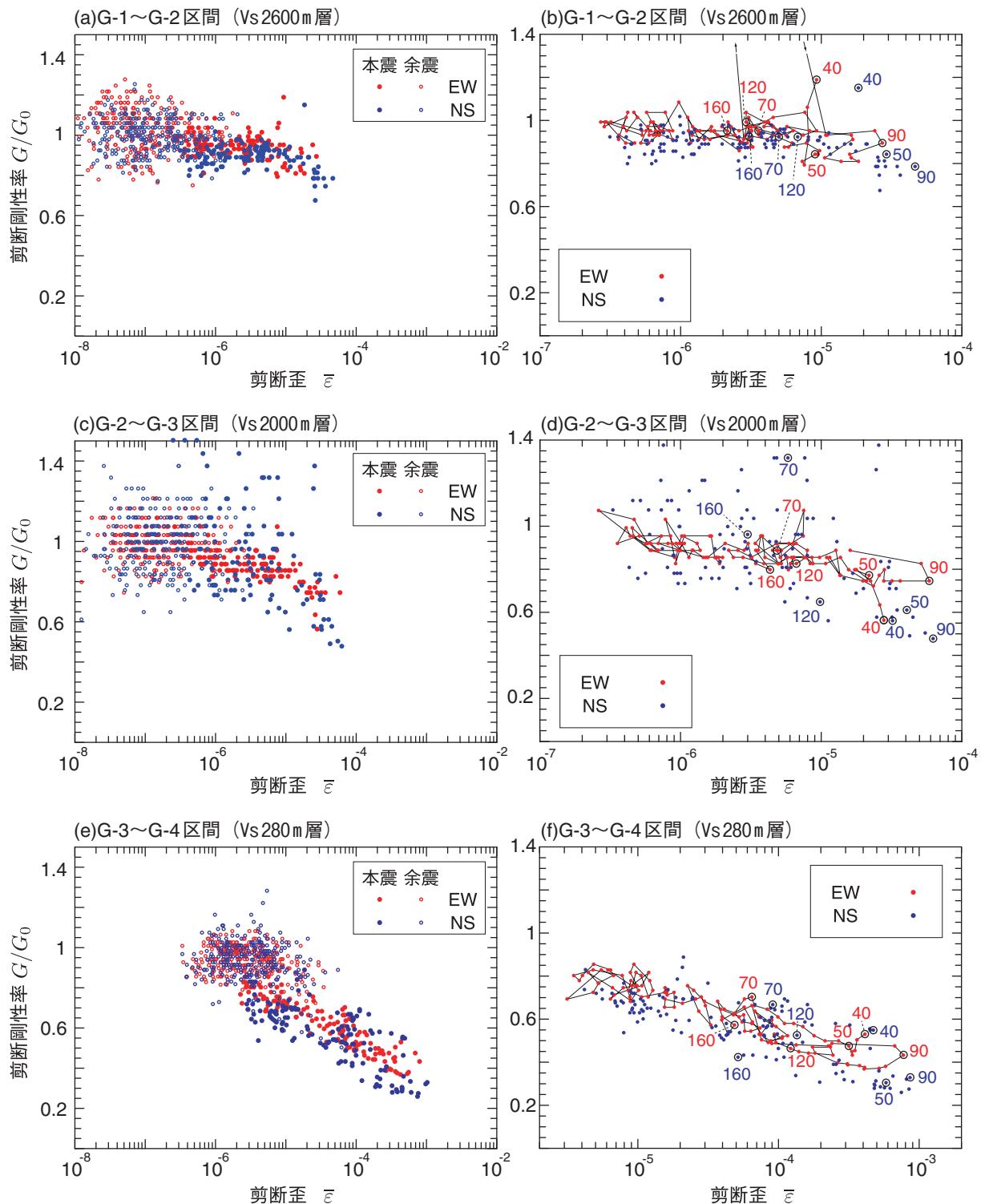


図 9 (a)(b)G-1～G-2 区間、(c)(d)G-2～G-3 区間、(e)(f)G-3～G-4 区間に於ける本震と余震時の剪断剛性率と剪断歪の関係(左図)と本震における剪断剛性率と剪断歪の推移(右図)。右図では、EW 成分の結果について直線で結んで、時間の推移に伴う変化を示すとともに、代表的なタイムウインドウとして第 1 破壊の最大振幅(40 s)、第 2 破壊の最大振幅(90 s)とその前後の 50 s、70 s、120 s、160 s の計 6 つのタイムウインドウの結果について○で囲むとともに、タイムウインドウの時間を記している。

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観測記録を使わせて頂くとともに、観測記録の詳細についてご教示いただいた。東北電力株式会社ならびに関係各位に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 東北電力株式会社：「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の余震等の加速度時刻歴波形データ」<追加> CD-ROM 添付資料、2011.
- 2) Satoh, T., Fushimi, M. and Tatsumi, Y.: Inversion of strain-dependent nonlinear characteristics of soils using weak and strong motions observed by borehole sites in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 91, No.2, 2001, pp.365–380.
- 3) 時松孝次、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の非線形性状と基盤露頭波、日本建築学会構造系論文集、Vol.73、No.630、2008、pp.1273–1280.
- 4) Kawakami, H. and Bidon, P. : A simplified input output relation method using AR model for earthquake wave propagation analysis, *Earthq. Engng. Struct. Dyn.*, Vol.26, 1997, pp.1041–1057.
- 5) Haddadi, H. R. and Kawakami, H. : Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM) method for multiple linear systems, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol.15, 1998, pp.29s–39s.
- 6) Kawakami, H. and Haddadi, H. R. : Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), *Soil Dyn. Earthq. Engng.*, Vol.17, 1998, pp.117–126.
- 7) 川上英二, 孫耀南, 楊仲元: 波動伝播と土粒子軌跡のモデル化による地表および地中の常時微動記録の解析、土木学会論文集、No.738/I-64、2003、pp.125–138.
- 8) Hadaddi, 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, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema, Rotterdam, Vol.2, 1998, pp.1015–1022.
- 9) 茂木秀則、Shrestha, S. M.、川上英二、岡村真也：柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーにおける新潟県中越沖地震とその前後の S 波速度の経時変化、日本地震工学会論文集、Vol.9、No.1、2009、pp.19–31.
- 10) 茂木秀則、Shrestha, S. M.、川上英二、川村潤也：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、Vol.9、No.5、2009、pp.44–56.
- 11) 東北電力株式会社：東北電力株式会社女川原子力発電所敷地地盤の振動特性について（平成 21 年 4 月 17 日）、www.nsc.go.jp/senmon/shidai/taishin_godo_WG1/taishin_godo_WG1_07/siryo3-2.pdf、2009.
- 12) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、1976.
- 13) 独立行政法人防災科学技術研究所（鈴木亘、青井真、関口春子文責）：2011 年 03 月 11 日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析（2011/08/12 改訂版）、www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo-20110311/inversion/、2011.
- 14) 東北電力株式会社土木建築部、私信、2012.
- 15) 青井真、刃刀卓、鈴木亘、森川信之、中村洋光、先名重樹、藤原広行：2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動、地震 2、Vol.64、No.3、2012、pp.169–182.
- 16) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計、物理探鉱、Vol.22、No.6、1978、pp.240–263.
- 17) 佐藤忠信他・土木学会編：動的解析と耐震設計、第 2 卷、動的解析の方法、土木学会、1989、p.193.
- 18) Ishihara, K., Shimizu, K. and Yamada, Y. : Pore water pressures measured in sand deposits during an earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.4, 1981, pp.85–100.
- 19) 長谷川誠、宮下国一郎、清水勝美、岡本明夫：地震による岩盤水理挙動－地下石油備蓄串木野基地の事例－、土木学会論文集、No.631/III-48、1999、pp.481–494.

- 20) 片岡俊一、長谷川誠、岡本明夫：地震時の岩盤内間隙水圧上昇に関する一考察、第 26 回日本地震工学研究発表会、2001、c1.
- 21) 片岡正次郎、谷本俊輔、中島進、松橋学、高宮進：観測記録に基づく河川堤防の地盤改良効果の検討、第 13 回日本地震工学シンポジウム、2010、G049.

(受理：2012 年 4 月 2 日)
(掲載決定：2012 年 9 月 10 日)

Temporal Change in Propagation Time of Seismic Waves Observed at Vertical Array in the Onagawa Nuclear Power Plant during, before, and after the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

MOGI Hidenori¹⁾ and KAWAKAMI Hideji²⁾

1) Member, Associate Professor, Saitama University, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Saitama University, Dr. Eng.

ABSTRACT

The Onagawa Nuclear Power Plant, operated by Tohoku Electric Power Co., Inc., is situated near the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The array records observed at the site during the earthquake provide valuable information about the wave propagation at a large strain level. In this study, the temporal changes in the propagation velocities of the seismic waves were examined based on the vertical array records during the mainshock and the events before and after it. It was revealed that (1) the shear rigidity of the soil layers between sensors G-3 and G-4 (from G.L.-27.3 to -1.7 m) decreased by 60–70% at the maximum strain of 1×10^{-3} due to the principal motion of the mainshock, whereas (2) the shear rigidity between sensors G-1 and G-2 (from G.L.-147.1 to -61.5 m) decreased only by 10–20% at the maximum shear strain of 5×10^{-5} .

Key Words : The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Onagawa NPP, Vertical Seismometer Array, NIOM Analysis, Propagation Time, Temporal Change, Nonlinear Behavior

表1 NIOM解析を行った地震の諸元¹⁾。表中T/Gはトリガータイム、T/Wは観測記録の開始時刻から測ったNIOM解析のタイムウィンドウの開始時刻を表す。

No.	発生日時	震源位置			M	震央距離	T/G	T/W	No.	発生日時	震源位置			M	震央距離	T/G	T/W
		緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)		(km)		(s)			緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)		(km)		(s)
1	2011/03/09 11:45	38.328	143.280	8.3	7.3	155.5	11:45:41	36.0	71	2011/03/11 20:44	36.743	142.444	7.0	5.7	202.0	20:46:28	19.2
2	2011/03/09 11:57	38.322	143.397	12.0	6.2	165.7	11:58:00	15.4	72	2011/03/11 20:46	36.083	141.197	38.6	5.6	258.8	20:48:03	18.5
3	2011/03/09 11:58	38.299	143.155	21.0	6.0	144.9	11:58:57	13.9	73	2011/03/11 21:13	37.146	142.212	21.0	6.1	152.7	21:13:18	22.0
4	2011/03/09 13:36	38.606	143.249	11.3	6.1	154.0	13:37:43	16.5	74	2011/03/11 21:15	39.094	142.448	24.0	5.9	112.9	21:15:59	31.4
5	2011/03/10 03:16	38.271	142.879	28.9	6.4	121.2	03:16:40	26.0	75	2011/03/11 21:54	38.469	142.193	46.0	5.1	61.0	21:55:02	26.1
6	2011/03/10 03:44	38.480	143.433	36.0	6.3	168.7	03:45:25	14.0	76	2011/03/11 21:56	37.746	141.997	17.8	5.3	84.7	21:56:20	25.5
7	2011/03/10 06:22	38.133	143.219	17.8	6.3	153.1	06:22:52	18.6	77	2011/03/11 22:16	36.443	141.857	20.0	5.7	219.7	22:18:37	18.9
8	2011/03/10 06:23	38.172	143.045	9.3	6.8	137.3	06:24:27	30.1	78	2011/03/12 01:11	39.431	143.810	53.0	5.8	230.5	01:12:41	18.3
9	2011/03/11 14:46	38.103	142.861	23.7	9.0	123.4	14:46:44	38.0	79	2011/03/12 01:56	38.032	142.084	30.0	4.9	65.4	01:57:03	20.0
10	2011/03/11 14:51	36.735	142.029	11.0	6.8	190.8	14:51:46	210.7	80	2011/03/12 03:11	37.135	142.046	16.2	6.1	148.5	03:12:06	19.0
11	2011/03/11 14:54	37.502	141.331	35.8	5.8	100.8	14:56:48	121.1	81	2011/03/12 03:16	38.179	141.826	5.4	4.5	37.6	03:16:09	22.5
12	2011/03/11 15:06	39.042	142.398	26.6	6.4	105.8	15:06:50	9.1	82	2011/03/12 03:59	36.986	138.598	8.4	6.7	299.5	04:00:54	18.9
13	2011/03/11 15:12	37.205	141.660	27.1	6.1	133.5	15:11:50	121.0	83	2011/03/12 04:02	39.226	143.305	37.0	6.3	181.5	04:03:26	34.0
14	2011/03/11 15:23	39.003	142.447	29.8	6.1	106.2	15:21:50	123.0	84	2011/03/12 04:24	35.795	141.044	34.2	5.7	292.2	04:24:29	19.0
15	2011/03/11 15:25	37.837	144.894	34.0	7.5	303.4	15:26:50	37.8	85	2011/03/12 05:11	38.857	142.773	0.0	6.4	121.9	05:11:43	33.5
16	2011/03/11 15:29	37.908	143.843	0.0	6.8	212.1	15:29:47	44.0	86	2011/03/12 05:26	37.625	141.645	40.6	5.1	87.0	05:26:56	61.7
17	2011/03/11 15:38	36.163	141.867	28.0	5.5	250.7	15:38:18	18.0	87	2011/03/12 05:36	37.650	142.728	6.0	5.6	136.1	05:36:49	16.6
18	2011/03/11 15:40	39.326	142.072	51.4	5.7	114.4	15:40:26	70.0	88	2011/03/12 06:00	38.102	142.596	10.0	5.5	101.3	06:01:17	18.5
19	2011/03/11 15:40	39.326	142.072	51.4	5.7	114.4	15:42:54	20.0	89	2011/03/12 07:51	37.775	144.645	41.0	5.7	283.9	07:52:30	18.5
20	2011/03/11 15:44	38.742	142.222	32.6	5.3	73.6	15:45:47	61.4	90	2011/03/12 08:59	36.462	141.477	23.9	5.5	215.3	09:00:15	18.7
21	2011/03/11 15:46	38.740	142.214	36.3	5.6	72.9	15:45:31	79.3	91	2011/03/12 09:25	37.717	141.983	26.3	4.8	86.9	09:25:29	18.5
22	2011/03/11 15:48	38.871	142.100	38.0	5.4	74.1	15:48:28	30.0	92	2011/03/12 10:04	37.895	141.525	59.9	4.8	56.0	10:04:21	20.5
23	2011/03/11 15:52	38.466	142.750	0.0	5.8	109.3	15:53:04	32.7	93	2011/03/12 10:24	37.675	142.039	17.9	4.9	93.3	10:24:35	18.4
24	2011/03/11 15:57	35.854	141.186	22.9	6.1	284.2	15:57:54	46.0	94	2011/03/12 10:34	38.648	143.095	41.0	6.0	141.6	10:34:07	19.7
25	2011/03/11 16:01	38.533	141.999	42.1	4.7	46.1	15:59:53	126.7	95	2011/03/12 10:47	37.471	142.756	0.0	6.8	151.0	10:47:44	30.0
26	2011/03/11 16:04	38.953	142.450	20.7	5.8	103.0	16:04:34	29.5	96	2011/03/12 10:59	37.416	142.630	10.0	5.5	147.6	11:01:18	18.2
27	2011/03/11 16:10	37.787	142.759	6.0	6.0	129.6	16:11:09	24.1	97	2011/03/12 11:30	38.470	141.951	35.0	4.6	40.2	11:30:12	25.3
28	2011/03/11 16:13	35.906	142.063	52.0	5.8	281.6	16:14:35	10.7	98	2011/03/12 11:47	37.529	143.480	14.0	5.9	198.8	11:48:27	18.5
29	2011/03/11 16:14	36.555	142.069	20.0	6.7	211.0	16:15:26	43.0	99	2011/03/12 12:01	39.568	142.903	6.1	5.6	177.8	12:02:31	19.0
30	2011/03/11 16:17	37.163	142.591	9.0	6.4	167.6	16:18:30	46.4	100	2011/03/12 13:06	38.736	142.167	40.0	5.3	69.2	13:06:27	22.7
31	2011/03/11 16:25	38.091	144.603	46.0	6.4	273.2	16:26:14	46.0	101	2011/03/12 15:18	39.158	142.705	44.0	5.5	134.4	15:19:00	31.8
32	2011/03/11 16:29	39.031	142.280	36.0	6.5	97.7	16:28:34	71.5	102	2011/03/12 16:07	38.261	142.248	30.0	4.9	67.1	16:07:44	24.0
33	2011/03/11 16:30	37.356	141.281	27.0	6.0	117.5	16:32:05	19.3	103	2011/03/12 19:17	37.892	142.332	0.0	4.8	92.1	19:18:00	18.0
34	2011/03/11 16:31	39.641	142.528	8.0	5.7	164.2	16:33:21	19.1	104	2011/03/12 19:53	38.998	142.538	20.5	5.8	112.1	19:53:47	31.0
35	2011/03/11 16:36	38.938	142.245	57.0	5.0	88.3	16:37:01	19.5	105	2011/03/12 21:53	37.760	142.755	2.0	5.9	130.9	21:54:20	27.0
36	2011/03/11 16:39	38.491	142.043	36.1	5.0	48.5	16:38:27	96.0	106	2011/03/12 22:15	37.197	141.426	40.1	6.2	133.7	22:16:03	32.0
37	2011/03/11 16:40	38.432	142.247	31.7	5.5	65.3	16:40:49	43.5	107	2011/03/12 23:03	38.784	142.743	7.0	5.8	116.3	23:04:00	18.5
38	2011/03/11 16:44	36.314	141.944	57.0	5.6	235.1	16:44:34	18.7	108	2011/03/12 23:43	39.470	142.696	9.3	5.9	157.8	23:43:36	31.0
39	2011/03/11 16:49	36.559	141.995	25.0	5.5	209.1	16:49:55	19.2	109	2011/03/13 06:48	39.584	142.932	0.0	5.6	180.8	06:48:52	19.0
40	2011/03/11 16:54	37.672	141.689	29.4	5.5	82.5	16:54:28	57.0	110	2011/03/13 07:12	37.605	142.054	8.6	6.1	100.8	07:13:02	30.0
41	2011/03/11 16:56	37.053	142.527	1.0	6.2	174.8	16:56:59	18.5	111	2011/03/13 08:20	37.956	142.319	3.3	5.3	87.0	08:20:55	29.3
42	2011/03/11 17:04	37.285	142.157	19.0	6.0	136.6	17:20:30	19.5	112	2011/03/13 08:24	38.012	141.948	15.2	6.2	58.2	08:24:58	25.5
43	2011/03/11 17:12	36.588	141.475	29.1	6.6	201.3	17:12:28	25.3	113	2011/03/13 14:55	38.289	142.248	38.0	4.9	66.5	14:55:21	22.0
44	2011/03/11 17:15	37.294	144.147	4.0	6.5	262.9	17:15:51	18.8	114	2011/03/13 18:25	39.040	142.673	9.7	5.5	124.3	18:25:39	18.0
45	2011/03/11 17:16	37.249	142.274	12.0	5.6	144.8	17:17:12	47.7	115	2011/03/13 18:52	38.814	142.121	42.5	5.6	71.1	18:52:52	19.9
46	2011/03/11 17:19	38.834	142.372	20.1	4.9	90.0	17:19:19	32.8	116	2011/03/13 20:27	38.652	142.121	44.1	4.8	61.0	20:27:50	19.4
47	2011/03/11 17:19	36.167	141.752	18.0	6.8	249.1	17:20:31	18.0	117	2011/03/13 20:37	37.396	142.434	2.3	6.1	138.4	20:37:54	34.0
48	2011/03/11 17:27	37.983	142.698	9.0	6.2	114.6	17:27:18	82.0	118	2011/03/14 03:45	38.370	142.351	29.0	4.8	74.4	03:45:25	27.2
49	2011/03/11 17:31	37.472	141.396	30.4	5.9	103.4	17:31:24	30.0	119	2011/03/14 10:02	36.458	141.125	31.8	6.2	218.2	10:03:33	19.0
50	2011/03/11 17:43	36.254	142.166	4.0	6.0	245.6	17:43:50	18.7	120	2011/03/14 15:12	37.805	142.588	7.0	6.5	115.9	15:12:57	31.5
51	2011/03/11 17:43	36.254	142.166	4.0	6.0	245.6	17:44:46	18.5	121	2011/03/14 17:23	38.117	142.162	13.7	4.9	65		

表1(つづき) NIOM解析を行った地震の諸元

No.	発生日時	震源位置			M	震央距離	T/G	T/W	No.	発生日時	震源位置			M	震央距離	T/G	T/W
		緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)		(km)		(s)			緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)		(km)		(s)
141	2011/03/17 13:13	40.126	142.411	31.1	5.9	207.4	13:14:54	17.0	211	2011/05/02 11:09	37.653	141.601	47.7	4.7	83.4	11:09:59	19.3
142	2011/03/17 17:44	38.420	142.299	22.5	4.7	69.8	17:45:06	19.5	212	2011/05/02 21:36	38.314	142.233	37.8	4.7	64.7	21:37:03	21.7
143	2011/03/17 21:54	36.738	141.309	47.0	5.7	185.4	21:55:39	19.5	213	2011/05/03 22:35	38.803	142.042	47.2	4.8	65.2	22:36:14	19.3
144	2011/03/18 03:55	37.142	142.523	9.0	5.7	166.2	03:56:21	15.0	214	2011/05/05 23:58	38.212	144.119	42.0	6.1	229.5	23:59:17	18.0
145	2011/03/18 04:02	38.273	142.277	34.5	4.7	69.3	04:03:12	20.5	215	2011/05/06 14:14	39.078	142.231	43.8	4.7	98.7	14:15:23	19.1
146	2011/03/18 16:30	38.821	141.943	49.5	4.5	60.8	16:31:07	18.6	216	2011/05/08 05:52	40.245	142.501	33.6	5.7	222.6	05:53:19	19.0
147	2011/03/18 21:21	38.099	142.118	19.8	4.7	63.5	21:21:19	19.1	217	2011/05/08 19:42	37.650	141.589	46.4	4.7	83.6	19:43:08	28.4
148	2011/03/19 04:53	37.598	141.585	43.3	5.2	89.3	04:53:19	29.1	218	2011/05/12 03:21	38.529	141.815	50.5	4.6	31.1	03:22:03	18.5
149	2011/03/19 08:32	39.185	142.421	36.7	5.7	118.4	08:33:30	20.0	219	2011/05/14 08:35	37.328	141.628	40.9	5.9	119.6	08:36:15	28.0
150	2011/03/19 08:49	37.727	141.912	16.4	5.3	83.0	08:49:26	20.2	220	2011/05/15 08:50	37.656	141.583	47.7	5.1	82.9	08:51:02	29.1
151	2011/03/19 11:55	37.739	141.686	44.7	4.7	75.2	11:56:19	19.1	221	2011/05/16 04:07	38.629	141.934	48.4	4.7	45.7	04:07:56	20.2
152	2011/03/19 18:56	36.784	140.571	5.4	6.1	197.2	18:57:41	19.5	222	2011/05/19 17:32	38.329	141.776	59.8	4.8	25.4	17:32:58	26.5
153	2011/03/20 05:48	37.690	141.732	44.6	4.6	81.4	05:48:51	19.5	223	2011/05/23 14:20	38.190	142.154	16.1	4.8	61.7	14:21:15	19.0
154	2011/03/20 08:37	38.607	141.886	50.7	4.7	40.9	08:37:22	24.9	224	2011/06/03 09:05	37.303	143.833	57.0	6.1	238.4	09:06:02	20.0
155	2011/03/20 10:30	36.939	141.177	29.3	5.5	164.7	10:31:26	20.2	225	2011/06/04 01:00	36.990	141.211	29.6	5.5	158.6	01:00:55	19.5
156	2011/03/20 14:55	37.663	141.649	42.2	5.4	82.8	14:55:42	29.5	226	2011/06/07 05:10	37.773	141.601	47.9	4.6	70.1	05:10:48	19.0
157	2011/03/20 21:03	39.344	142.048	47.8	5.9	115.3	21:04:18	19.0	227	2011/06/11 07:35	38.363	142.223	36.1	5.0	63.3	07:36:07	24.5
158	2011/03/22 16:18	37.086	144.248	28.0	6.7	282.3	16:19:50	19.0	228	2011/06/14 22:06	37.812	143.583	50.0	6.0	193.7	22:07:42	19.9
159	2011/03/22 18:19	37.316	141.910	43.0	6.4	125.7	18:19:26	29.5	229	2011/06/18 20:31	37.618	141.821	27.6	6.0	91.3	20:31:21	28.0
160	2011/03/23 00:12	38.284	141.875	46.6	4.7	35.2	00:12:36	20.2	230	2011/06/23 06:50	39.948	142.591	36.4	6.9	196.3	06:51:32	28.0
161	2011/03/23 07:12	37.085	140.788	7.6	6.0	158.8	07:13:16	19.0	231	2011/06/23 19:35	38.467	141.608	57.2	5.3	12.2	19:35:11	24.0
162	2011/03/23 07:13	37.035	140.769	0.9	5.8	164.6	07:14:40	17.5	232	2011/07/07 13:02	38.019	142.303	38.2	4.7	82.0	13:02:27	19.0
163	2011/03/23 07:34	37.098	140.796	6.7	5.5	157.2	07:35:40	19.0	233	2011/07/08 03:35	37.097	141.130	55.5	5.6	148.3	03:36:19	20.0
164	2011/03/23 07:36	37.063	140.771	7.3	5.8	161.7	07:37:16	19.0	234	2011/07/08 22:08	38.427	142.196	29.6	4.5	60.9	22:09:00	19.1
165	2011/03/23 23:48	37.582	141.891	18.1	4.6	97.1	23:48:37	19.0	235	2011/07/10 09:57	38.032	143.507	34.0	7.3	180.1	09:57:37	36.0
166	2011/03/24 13:56	38.741	142.322	38.0	4.5	81.1	13:56:31	19.0	236	2011/07/11 10:36	38.425	142.203	34.7	4.6	61.5	10:36:15	26.0
167	2011/03/24 17:20	39.077	142.358	33.7	6.2	106.0	17:21:15	31.0	237	2011/07/12 17:59	38.761	142.062	56.9	4.8	63.4	18:00:13	26.3
168	2011/03/25 04:44	38.790	142.208	41.8	4.8	75.5	04:45:07	19.2	238	2011/07/12 18:40	37.620	142.049	25.2	4.5	99.1	18:41:10	18.0
169	2011/03/25 20:36	38.729	142.107	44.7	6.3	64.4	20:36:37	26.3	239	2011/07/13 00:37	38.331	142.007	47.2	5.1	45.0	00:37:33	25.7
170	2011/03/26 19:18	38.567	141.892	49.0	5.2	39.0	19:18:45	24.8	240	2011/07/14 10:34	38.436	141.838	57.1	4.8	29.9	10:35:05	25.8
171	2011/03/26 19:23	37.525	141.784	22.2	4.6	100.3	19:24:08	19.1	241	2011/07/23 13:34	38.874	142.091	47.2	6.4	73.8	13:34:38	27.0
172	2011/03/28 07:23	38.384	142.346	31.7	6.5	73.9	07:24:10	27.3	242	2011/07/25 00:07	38.844	142.118	44.5	5.2	73.1	00:07:30	18.5
173	2011/03/28 16:32	38.812	142.435	33.4	4.5	93.4	16:33:07	19.0	243	2011/07/25 03:51	37.709	141.627	45.8	6.3	77.5	03:51:39	28.3
174	2011/03/29 19:54	37.409	142.470	13.4	6.6	139.2	19:54:57	34.0	244	2011/07/25 20:04	38.564	142.078	44.8	5.2	53.7	20:04:59	24.3
175	2011/03/30 07:33	38.432	142.213	33.2	4.5	62.4	07:33:21	20.0	245	2011/07/26 05:39	38.538	141.820	50.3	4.6	32.0	05:40:05	24.4
176	2011/03/30 22:00	38.651	142.155	41.7	5.1	63.6	22:00:17	25.7	246	2011/07/31 03:53	36.903	141.221	57.3	6.5	168.0	03:54:18	36.0
177	2011/03/31 16:15	38.872	142.084	47.4	6.1	73.2	16:15:49	21.5	247	2011/08/01 04:33	38.722	142.341	42.6	4.6	81.6	04:34:12	19.0
178	2011/04/06 07:01	38.400	142.311	27.0	5.0	70.8	07:02:11	26.4	248	2011/08/01 15:54	38.654	142.150	42.2	4.6	63.4	15:55:18	19.0
179	2011/04/06 14:54	38.399	142.296	31.5	4.5	69.5	14:54:41	19.2	249	2011/08/01 22:44	39.816	142.254	43.1	5.8	170.5	22:45:37	14.6
180	2011/04/06 22:54	37.634	141.572	45.9	5.3	85.3	22:55:05	28.9	250	2011/08/11 22:31	38.449	142.231	30.2	5.3	64.1	22:31:34	25.5
181	2011/04/07 01:25	38.387	142.145	39.5	4.5	56.4	01:25:57	19.1	251	2011/08/12 03:22	36.969	141.161	52.3	6.1	161.7	03:22:39	25.0
182	2011/04/07 23:32	38.204	141.920	65.9	7.1	42.7	23:32:55	27.0	252	2011/08/17 12:05	38.460	142.188	30.7	5.1	60.4	12:05:15	26.0
183	2011/04/07 23:36	38.376	141.923	58.0	4.5	37.1	23:36:01	75.4	253	2011/08/17 12:14	38.469	142.195	28.3	4.5	61.2	12:14:39	25.4
184	2011/04/07 23:40	38.237	141.899	64.8	4.7	39.3	23:40:35	26.3	254	2011/08/17 20:44	36.769	143.764	52.0	6.2	269.5	20:45:17	16.4
185	2011/04/07 23:40	38.237	141.899	64.8	4.7	39.3	23:41:40	18.6	255	2011/08/19 13:51	39.099	142.143	44.9	4.5	95.8	13:51:28	18.5
186	2011/04/07 23:47	38.302	141.921	58.0	4.8	38.4	23:47:40	19.5	256	2011/08/19 14:36	37.649	141.797	51.1	6.5	87.4	14:36:48	30.0
187	2011/04/07 23:49	38.142	141.818	58.6	4.6	39.9	23:49:46	25.3	257	2011/08/21 07:58	38.622	141.956	50.1	4.8	46.9	07:58:51	25.5
188	2011/04/07 23:53	38.359	141.905	59.3	4.6	35.7	23:53:31	18.7	258	2011/09/07 14:42	38.647	142.166	41.8	4.6	64.3	14:42:27	19.1
189	2011/04/08 00:25	38.204	141.852	62.8	4.5	37.7	00:25:24	26.2	259	2011/09/13 23:14	38.936	142.414	34.7	4.7	99.4	23:14:56	20.0
190	2011/04/09 18:42	38.247	141.815	58.2	5.4	32.4	18:42:30	25.5	260	2011/09/14 23:56	37.738	141.791	50.9	4.6	77.8	23:56:59	19.3
191	2011/04/11 00:07	38.329	141.866	63.5	4.5	33.0	00:07:18	24.7	261	2011/09/15 17:00	36.255	141.483	50.9</				