

# 新潟県中越沖地震に関する適用例

APPLICATION TO THE 2007 CHUETSU-OKI, NIIGATA, JAPAN, EARTHQUAKE

野津厚\*1

Atsushii NOZU

In this article, an application of the forthcoming AIJ guideline for design ground motions to the 2007 Chuetsu-oki, Niigata, Japan, earthquake is described. The strong motion simulation technique based on site specific amplification and phase characteristics is used. The strong ground motions at near source stations were synthesized, at first, based on the optimized asperity model for this earthquake. The synthetic ground motions for this case were quite consistent with the observed ones. Then, strong ground motions were synthesized based on the asperity models constructed based on the recommendations in the guideline and regional information on the short-period level of the source spectrum. The velocity waveforms were fairly consistent with the observed ones when two or three asperities were considered.

## 1. はじめに

刊行予定の設計用入力地震動作成ガイドライン<sup>1)</sup>の内陸地殻内地震への適用事例として、ここでは、2007年新潟県中越沖地震への適用事例を示す。最初に、この地震の観測波形を再現するようにチューニングされた複数アスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示す。次に、ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示す。その際、震源断層の位置と地震の規模（地震モーメント）は与えられているものとし、それ以後のパラメータ設定を行う。また、北陸地方で発生した既往の大地震の短期レベル<sup>2)</sup>を参考にする。

## 2. 本検討で用いる強震波形計算手法

想定地震の震源特性と伝播経路特性およびサイト特性を考慮した上で対象地点での揺れを計算する方法にはいくつかのものがある<sup>1)</sup>。ここでは経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法<sup>3)5)6)</sup>を用いる。ガイドラインでは統計的グリーン関数法の一つに分類されている。

この方法では、まず、小規模な地震による対象地点での地震動を評価し（これをグリーン関数という）、これを重ね合わせることで、大地震による揺れを評価する。具体的な手順としては次のようになる。

まず、想定地震のアスペリティ（の一つ）に注目し（図1の large event）、これを  $N \times N$  に分割し、分割後の各々の小断層と同じ面積の小地震（図1の small event）を考

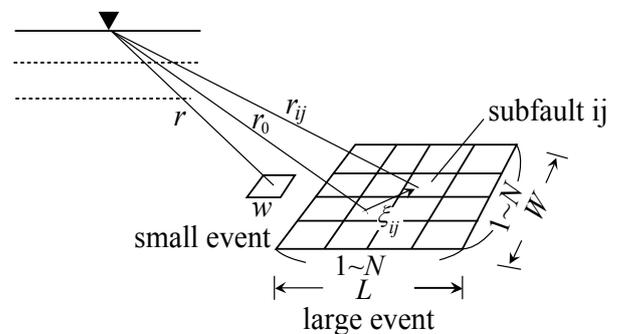


図1 グリーン関数の重ね合わせ

増幅特性を乗じることによりグリーン関数のフーリエ振幅を定める。ここに小地震の震源スペクトルと伝播経路特性はそれぞれ式(1)と式(2)で評価する<sup>7)</sup>。

$$|S(f)| = R_{0\phi} \cdot FS \cdot PRITIN \cdot \frac{M_{0e}}{4\pi\rho V_s^3} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (1)$$

$$|P(f)| = \frac{1}{r} \exp(-\pi f r / Q V_s) \quad (2)$$

ここに、

$M_{0e}$  : 小地震の地震モーメント

$f_c$  : 小地震のコーナー周波数

$\rho$  : 地震基盤における媒質の密度

$V_s$  : 地震基盤における媒質のS波速度

$R_{0\phi}$  : ラディエーション係数

$FS$  : 自由表面による増幅の効果 (=2)

$PRITIN$  : 地震動のエネルギーが水平方向の2成分に分散する効果を表す係数

$r$  : 小地震の震源距離

$Q$  : 伝播経路における媒質のQ値

\*1 港湾空港技術研究所

小地震の地震モーメント  $M_{0e}$  はアスペリティの地震モーメントを  $N^3$  で除すことにより求めることができる。小地震のコーナー周波数  $f_c$  は Brune<sup>8)9)</sup> の次式により求めることができる。

$$f_c = 0.66 V_s / \sqrt{S_e} \quad (3)$$

ここに、

$S_e$  : 小地震の破壊領域の面積

式(3)は Brune<sup>8)</sup> の式(36)そのものである。式(3)と Esherby<sup>10)</sup> による円形クラックの式を組み合わせると、コーナー周波数を地震モーメントと応力降下量の関数として表現する式<sup>1)</sup>を導くことができる。式(2)において伝播経路における媒質の  $Q$  値は地域に応じて適切な値を用いる。本検討では東日本の内陸部に対して推定<sup>11)</sup>されている  $Q=166f^{0.76}$  を用いる。

グリーン関数のフーリエ位相としては、対象地点で得られている中小地震観測記録のフーリエ位相をそのまま用いる。対象地点において複数の中小地震観測記録が利用可能である場合には、対象地点への入射角ができるだけ想定地震と類似した中小地震のフーリエ位相を用いる。そうすることにより、堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に計算結果に反映できる。

以上の方法で評価される周波数領域のグリーン関数を式で示すと次のようになる。

$$|S(f)| |P(f)| |G(f)| |O_s(f)| / |O_s(f)|_p \quad (4)$$

ここに、

$|S(f)|$  : 小地震の震源スペクトル (実数)

$|P(f)|$  : 伝播経路特性 (実数)

$|G(f)|$  : サイト増幅特性 (実数)

$O_s(f)$  : 対象地点で得られた中小地震記録のフーリエ変換 (複素数)

$|O_s(f)|_p$  :  $O_s(f)$  の絶対値をとり Parzen ウィンドウを適用したもの (実数)

サイト増幅特性として地震基盤～地表のものを用いる場合には地表における観測波のフーリエ位相を用い、サイト増幅特性として地震基盤～工学的基盤のものを用いる場合には観測波を工学的基盤に引き戻した 2E 波のフーリエ位相を用いる。Parzen ウィンドウのバンド幅は本検討では 0.05Hz とする。式(4)をフーリエ逆変換すると時間領域のグリーン関数が得られる。

アスペリティからの地震動は、グリーン関数を次式<sup>1)12)</sup>により重ね合わせることで算定できる (図 1)。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r/r_{ij}) f(t) * u(t-t_{ij}) \quad (5)$$

$$f(t) = \delta(t) + \left\{ 1/n' / (1-e^{-1}) \right\} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[ e^{-(k-1)/(N-1)/n'} \delta\{t - (k-1)\tau / (N-1)/n'\} \right] \quad (6)$$

$$t_{ij} = (r_{ij} - r_0) / V_s + \xi_{ij} / V_r \quad (7)$$

ここに、

$U(t)$  : アスペリティからの地震動

$u(t)$  : グリーン関数

$f(t)$  : 大地震と小地震の滑り速度時間関数の違いを補正するための関数

$r$  : 小地震の震源距離

$r_{ij}$  :  $ij$  要素から対象地点までの距離

$N$  : 分割数 (図 1)

$\tau$  : ライズタイム

$n'$  : 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための整数

$r_0$  : アスペリティの破壊開始点から対象地点までの距離

$\xi_{ij}$  : 破壊開始点から  $ij$  要素までの距離

$V_s$  : 地震基盤の S 波速度

$V_r$  : 破壊伝播速度

アスペリティが複数あるときには、各アスペリティについて同様の作業を行い、各アスペリティからの寄与を加え合わせることにより、対象地点における地震動を評価する。評価された地震動は、式(4)で用いたサイト増幅特性および中小地震記録の位相に応じて、地表波もしくは工学的基盤の 2E 波となる。

最後に、多重非線形効果<sup>13)</sup>を考慮して対象地点における地震動を評価するための方法<sup>14)</sup>について述べる。まず、式(4)において  $|G(f)|$  として地震基盤から工学的基盤までのサイト増幅特性を用意する。また、対象地点で得られた中小地震記録を工学的基盤に引き戻し、これを式(4)で  $O_s(f)$  として用いる。そして式(4)をフーリエ逆変換すると、工学的基盤における 2E 波とみなすことのできるグリーン関数が得られる。次に、式(5)により多重非線形効果の影響を考慮してグリーン関数の補正を行う。

$$g_n(t) = g(t) \quad (t < t_0)$$

$$g_n(t_0 + (t - t_0) / v_1) = g(t) \exp(-v_2 \omega (t - t_0)) \quad (t > t_0)$$

$$(5)$$

ここに  $g(t)$  は補正前のグリーン関数、 $g_n(t)$  は補正後のグリーン関数、 $t_0$  はグリーン関数上での直達 S 波到来時刻、

$v_1$ は堆積層における平均的なS波速度の低下率,  $v_2$ は堆積層における平均的な減衰定数の増分を表す.そして, 補正後のグリーン関数を重ね合わせることにより, 工学的基盤における大地震時の地震動(2E波)を計算し, これを入力した表層地盤の有効応力解析を行うことにより, 大地震時の地表における地震動を計算する. なお, 式(5)の右边を計算する際, グリーン関数に含まれる振動数成分が狭帯域であれば, その振動数に対応した $\omega$ を用い, 広帯域であれば, まず $g(t)$ から帯域通過フィルタにより特定の帯域(バンド幅 $f_b$ )をとりだし, この時間関数に $\exp(-v_2\omega(t-t_0))$ を乗じた上で, すべての帯域について加え合わせる. バンド幅 $f_b$ は本検討では0.1Hzとする.

ここで紹介した強震波形計算手法により既往の大地震記録の再現を試みた事例が文献(6)で紹介されている.

### 3. 発電所の敷地におけるサイト増幅特性の評価

2007年新潟県中越沖地震の記録が得られている観測点のうち, 特に震源に近い観測点としては, 防災科学技術研究所のK-NET<sup>15)</sup>の寺泊(NIG016)と柏崎(NIG018)の他に柏崎刈羽原子力発電所の敷地における観測点がある(図2のKKZ1R2など). ここではこれらの観測点を対象とする. 上で述べた手法を適用するためには, これらの観測点における経験的サイト増幅特性が必要である. ここでは, K-NETの観測点における経験的サイト増幅特性としては既往の研究<sup>16)</sup>のものを用いた. 発電所の観測

点における経験的サイト増幅特性は次のような手順で求めた. まず, 発電所を取り囲むように存在するK-NETの寺泊, 長岡, 柏崎の3地点で観測されている中小地震(いずれも本震以前に発生した5つの地震)を選択し, 中小地震の震源スペクトルは $\omega^{-2}$ モデルに従うと仮定して, 3地点でのフーリエスペクトルが再現されるように中小地震の震源パラメータを決定した. 図3には2005年8月21日の地震(M5.0)に対する3地点でのフーリエスペクトルの再現状況を示す. 次に, 決定した震源パラメータを用いて発電所の地震基盤におけるフーリエスペクトルを計算し, これと発電所における実際の観測スペクトルとの比を計算することによって, 1~7号機の基礎版上における経験的サイト増幅特性を求めた. 経験的サイト増幅特性は地震毎に少しずつ異なる値をとる. 例えば1号機基礎版上に対して $\mu+\sigma$ と $\mu-\sigma$ をプロットすると図4の灰色の線のようになる. 全く同様の作業を中越沖地震の6つの余震に対しても行くと, 図4の黒い線が得られる. 本震以前の地震から評価されたサイト増幅特性と余震から評価されたサイト増幅特性との間には本質的な違いはないことがわかる. そこで, 以後の解析では, 余震から評価されたサイト増幅特性の平均値を用いる. こうして評価された1~7号機基礎版上における経験的サイト増幅特性を図5に示す. この図からわかるように, 発電所基礎版上におけるサイト増幅特性は, NIG018のような高いピークを有するものではないが, NIG016のように小さいものでもなく, その中間的なものである

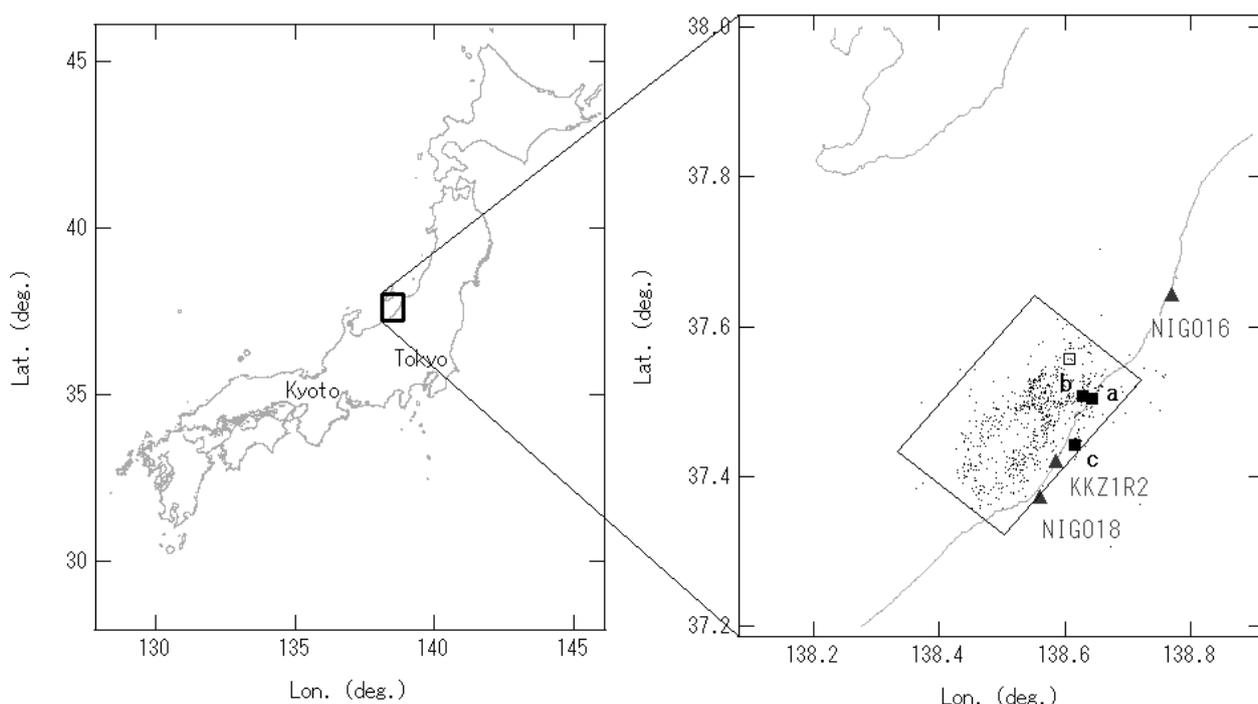


図2 2007年新潟県中越沖地震の震源断層と本震の震央(□), 震源モデルの構築に用いた観測点(▲), およびグリーン関数の位相を決めるために用いた中小地震(a, b, c).

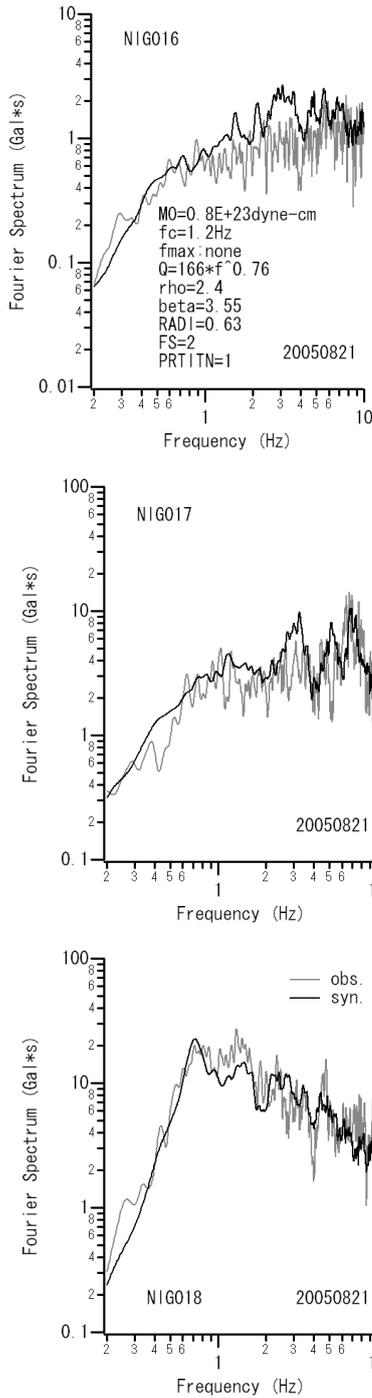


図3 2005年8月21日の地震(M5.0)の震源スペクトルを設定しK-NETの3地点でのフーリエスペクトルを再現した状況

ことがわかる。なお、1号機~7号機の基礎版上におけるサイト増幅特性は高周波側で落ち込んでいく傾向が見られるが、これは建屋による入力損失の影響であると考えられる。建屋の影響のない発電所サービスホール地表(SG1)に関して同じ方法で評価されたサイト増幅特性(図6)はこうした落ち込みを示さない。

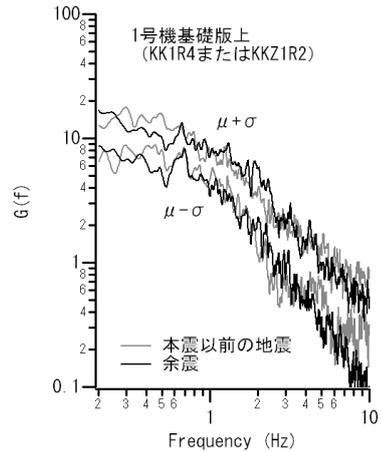


図4 1号機基礎版上において本震以前の地震および余震から評価されたサイト増幅特性( $\mu + \sigma$ と $\mu - \sigma$ を表示)

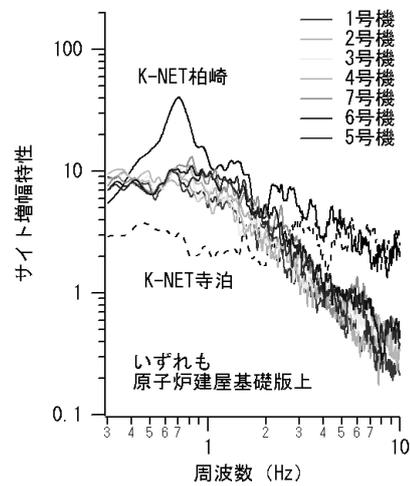


図5 1~7号機の基礎版上におけるサイト増幅特性(余震から評価されたもの;  $\mu$ を表示)

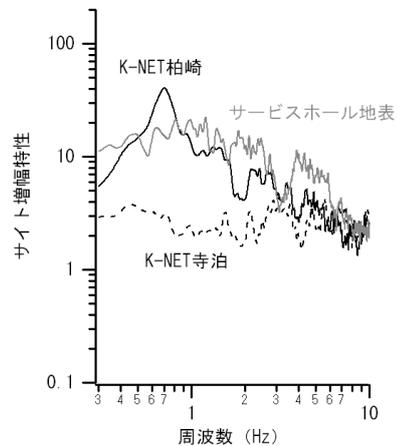


図6 サービスホール地表におけるサイト増幅特性(余震から評価されたもの;  $\mu$ を表示)

#### 4. チューニングされた複数アスペリティモデルによる強震動シミュレーション

ここでは、震源近傍における観測波形が再現されるようにチューニングされた複数アスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示す。

複数アスペリティモデルの構築には波形インバージョン結果を利用した。図7のコンターは経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンによるすべり分布である。ここで断層面の走向は  $40^\circ$ 、傾斜は  $36^\circ$  である。波形インバージョンについて詳しくは文献17)を参照されたい。ただし、図7のすべり分布は、文献17)よりも対象地点を1箇所(KSH)増やして実施された波形インバージョンの結果である。このすべり分布において、すべり量が大きいと考えられる部分に長方形のアスペリティを配置し、発電所における速度波形の再現性に特に注意しながら、図7に示すような複数アスペリティモデルを構築した。この震源モデルは1~3のアスペリティで構成されており、面積はそれぞれ  $4\text{km}^2$ 、 $24\text{km}^2$ 、 $9\text{km}^2$ 、地震モーメントはそれぞれ  $0.4\text{E}+25\text{dyne-cm}$ 、 $1.0\text{E}+25\text{dyne-cm}$ 、 $1.0\text{E}+25\text{dyne-cm}$ 、ライズタイムはそれぞれ  $0.17\text{s}$ 、 $0.33\text{s}$ 、 $0.25\text{s}$ 、分割数はすべて  $5 \times 5 \times 5$  である。各アスペリティは全体の破壊開始点に最も近いコーナーから同心円状に壊れるものとし、破壊伝播速度はインバージョン結果をもとに  $3.0\text{km/s}$  とした。各アスペリティの相対的な破壊時刻は  $1.3\text{s}$ 、 $2.4\text{s}$ 、 $6.4\text{s}$  である。震源付近の密度は  $2.7\text{g/cm}^3$ 、S波速度は  $3.5\text{km/s}$  とした。 $R_{\theta\theta}$ としては全方位への平均値  $0.63$  を用いた。 $PRTTN$ の値は  $0.63-0.77$  の範囲で観測波が最もうまく再現されるように設定した(EW成分とNS成分の自乗和は1)。波形の再現計算を行う過程で、

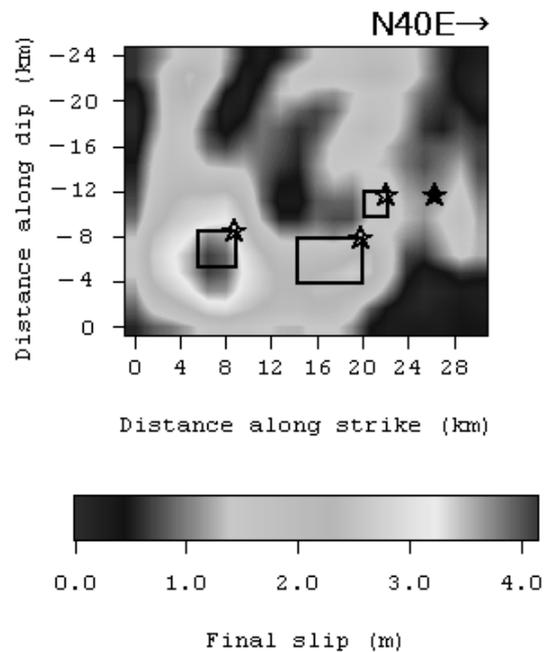


図7 2007年新潟県中越沖地震に対し、波形インバージョンで求めたすべり分布(コンター)と構築した複数アスペリティモデル(長方形)。 $\star$ は全体の破壊開始点、 $\star$ は各アスペリティの破壊開始点。断層面の走向は  $40^\circ$ 、傾斜は  $36^\circ$ 。

1~7号機基礎版上の波形に対しても多重非線形効果を考慮するためのパラメータを適用した方が良いと判断されたので、すべて  $\nu_1=0.85$ 、 $\nu_2=0.01$  を用いた。K-NET 柏崎については、工学的基盤における2E波に対して  $\nu_1=0.8$ 、 $\nu_2=0.06$  を適用し、さらに表層地盤の有効応力解析<sup>18)</sup>を行った。

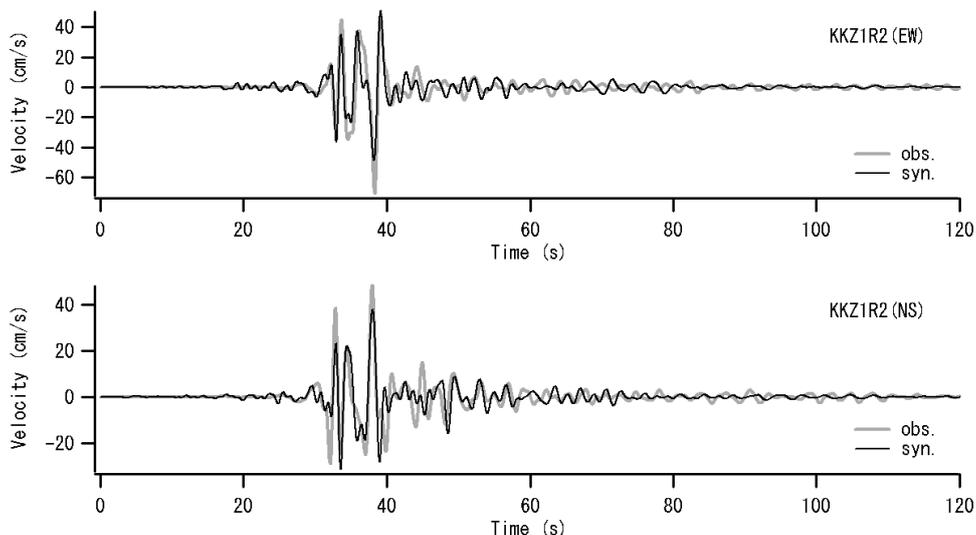


図8 チューニングされた複数アスペリティモデルによる1号機の基礎版上(KKZ1R2)における速度波形(0.2-1Hz)の再現状況。観測波にみられる3つのパルスがそれぞれアスペリティ1-3に対応。

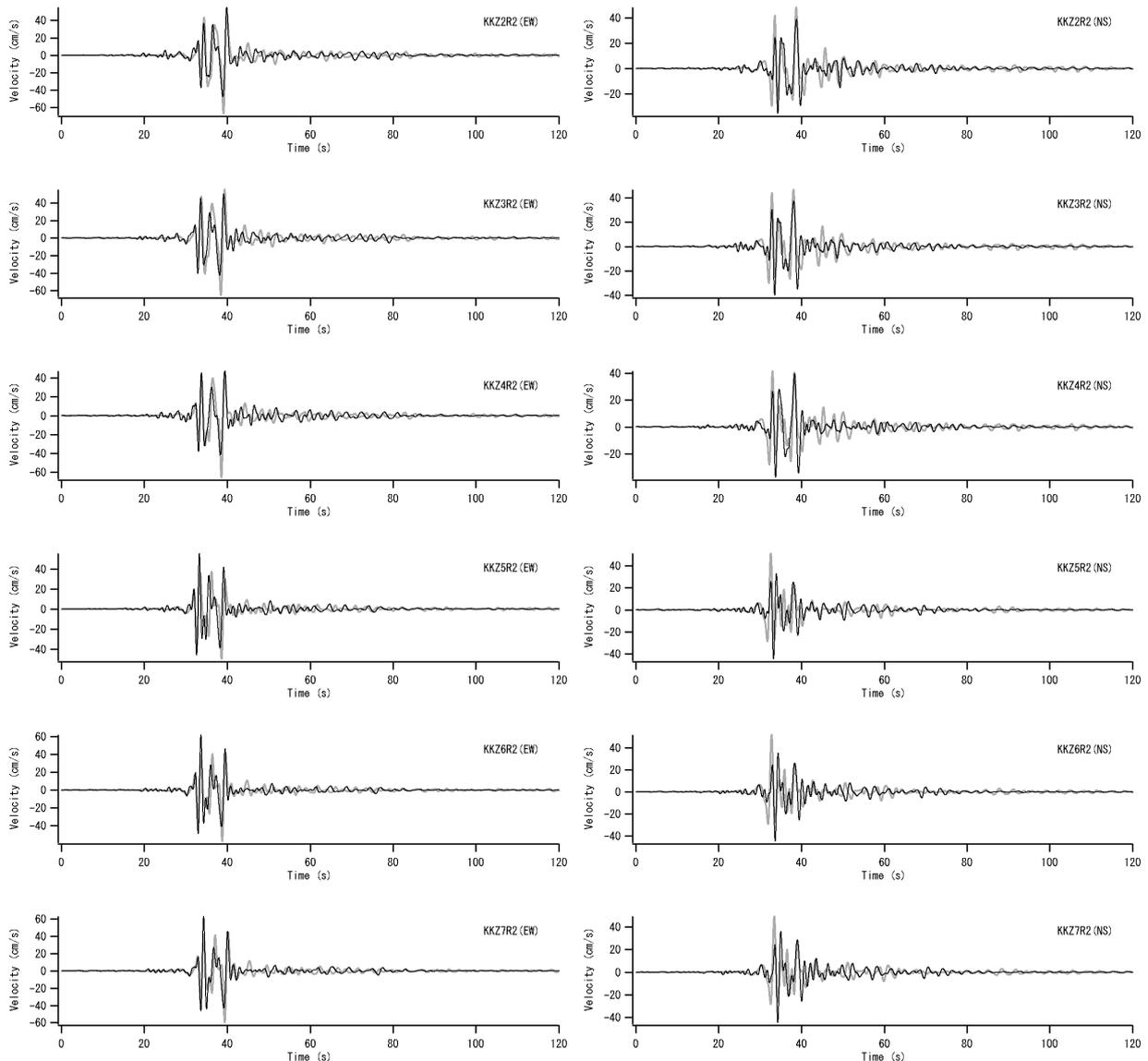


図9 チューニングされた複数アスペリティモデルによる2号機～7号機の基礎版上における速度波形(0.2-1Hz)の再現状況。灰色の線が観測結果で黒の線が計算結果。

この特性化震源モデルにより、発電所の敷地で観測されたパルス状の速度波形は図8と図9に示すように良好に再現される。ここで特に0.2-1Hz(周期1-5秒)の帯域に着目して震源モデルのチューニングを行ったのは、著者が主に研究対象としている港湾構造物に対してこの帯域の地震動が与える影響が大きいからであるが、我が国のほとんどの超高層建物もこの帯域に固有周期を有していることから、この帯域の波形を再現できる震源モデルおよび強震波形計算手法は建築の分野においても有用ではないかと考えている。

図8に典型的に見られるように、発電所で観測された速度波形は主に3つのパルスからなる。これらは図7の1-3のアスペリティに対応している(図10に1号機基礎版上のEW成分の速度波形への各アスペリティの寄与を

示す)。1つめのパルスは最も周期が短く、2つ目のパルスは最も周期が長く、3つ目のパルスは中ぐらいの周期である。これらに対応して、アスペリティのサイズは、アスペリティ1が最小、アスペリティ2が最大でなければならない。また、2つ目のパルスは3つ目のパルスほど振幅が大きくないから、アスペリティ2はアスペリティ3よりも応力降下量を小さく設定している(地震モーメントは同じだが面積が大きいのでその分応力降下量は小さい)。

発電所とは異なる方位に位置するK-NET 寺泊とK-NET 柏崎における速度波形の再現状況を図11と図12に示す。これらの地点においても波形の再現状況は概ね良好である。ここで注意する必要があるのは、K-NET 寺泊とK-NET 柏崎において最大速度に著しい違いが見ら

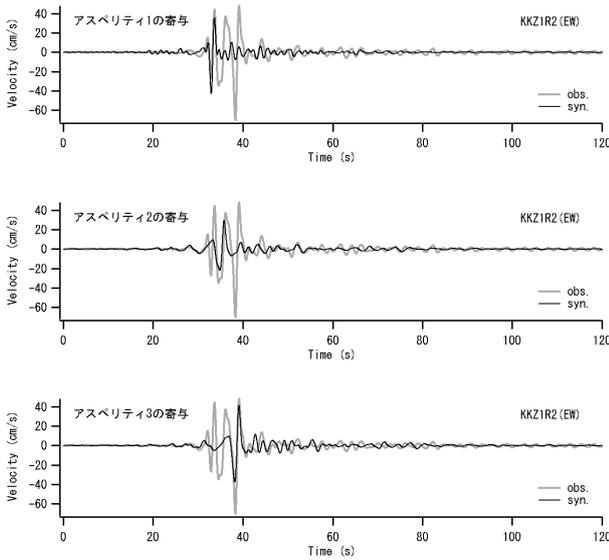


図10 1号機基礎版上 (KKZ1R2) のEW成分の速度波形 (0.2-1Hz) に対する各アスペリティの寄与.

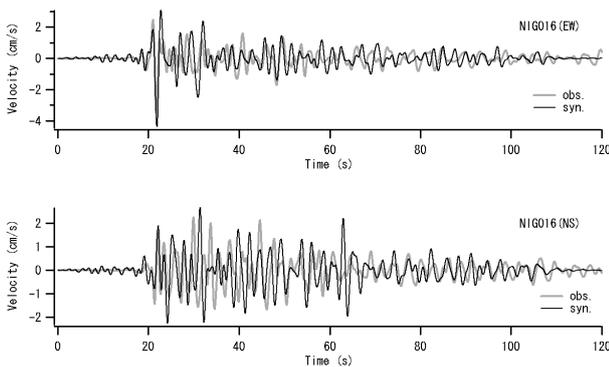


図11 チューニングされた複数アスペリティモデルによるK-NET 寺泊 (NIG016) における速度波形 (0.2-1Hz) の再現状況.

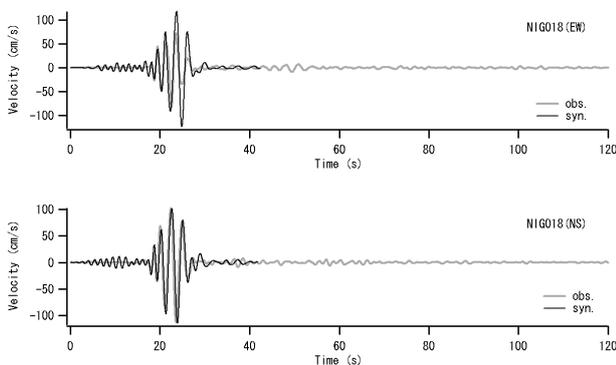


図12 チューニングされた複数アスペリティモデルによるK-NET 柏崎 (NIG018) における速度波形 (0.2-1Hz) の再現状況.

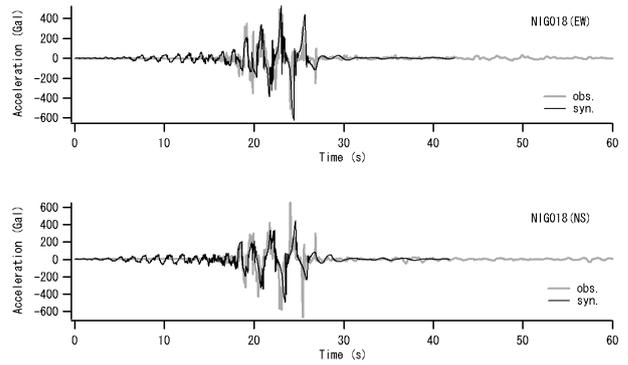


図13 チューニングされた複数アスペリティモデルによるK-NET 柏崎 (NIG018) における加速度波形の再現状況.

れるという点である (一方が 4cm/s 程度であるのに対し他方は 100cm/s 以上). こうした著しい違いは、図5に見られるような両者のサイト増幅特性の差異を考慮することによってはじめて再現が可能となる.

K-NET 柏崎における加速度波形の再現状況を図13に示す. この地点の加速度波形には過剰間隙水圧の影響によると見られるスパイク状のピークが生じているが、これをある程度再現できている. なお、この地点では、先に述べたように、多重非線形効果を考慮するほか、表層地盤の有効応力解析を行っている. 有効応力解析に用いた土質定数は表1および表2に示す通りである. 表1と表2の土質定数は原則としてN値と細粒分含有率から推定される値または当該解析手法<sup>18)</sup>において一般的に用いられる値である. ただし「砂2」と「砂3」のW1については、N値から推定される値をそのまま用いると液状化強度を過大評価する傾向が認められたので、小さめの値を設定していることをお断りしておく.

1号機~7号機の基礎版上およびK-NET 寺泊とK-NET 柏崎における加速度フーリエスペクトルの再現状況を図14に示す. 再現状況は概ね良好である. これらのフーリエスペクトルはすべて座標軸を揃えて示しているが、ここでも、K-NET 寺泊とK-NET 柏崎における低周波側の振幅レベルの違いが特に目を引く (実に30倍程度の振幅レベルの違いがある). また、発電所の敷地における低周波側の振幅レベルはそれらの中間程度となっている. これら本震時における揺れのスペクトル特性はサイト増幅特性 (図5) を色濃く反映していることがわかる.

表1 K-NET 柏崎における表層地盤の有効応力解析<sup>18)</sup>に用いた土質定数

層厚 (m)	名称	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$m_G, m_K$	$n$	$h_{max}$
3.3	砂-1	18.3	22.6	31558	82299	38.6	0.5	0.45	0.24
1.7	砂-2(水面上)	19.1	57.5	85950	224144	41.21	0.5	0.45	0.24
2.0	砂-2(水面下)	19.1	76.5	85950	224144	40.88	0.5	0.45	0.24
5.7	砂-3	19.1	102.7	85950	224144	41.69	0.5	0.45	0.24
3.1	シルト1-1	17.9	131.4	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
3.1	シルト1-2	17.9	149.7	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
3.1	シルト1-3	17.9	168.1	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
2.7	シルト質粘土1-1	17.9	185.3	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
2.7	シルト質粘土1-2	17.9	201.3	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
7.8	シルト質砂	18.9	235.3	85050	221797	39.69	0.5	0.45	0.24
3.8	シルト2	17.9	272.6	88404	230544	30	0.5	0.55	0.208
3.0	粘土質シルト-1	17.9	292.8	88404	230544	30	0.5	0.55	0.208
2.7	粘土質シルト-2	17.9	309.6	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
2.3	砂混じりシルト	17.9	324.5	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
1.0	シルト質粘土2	17.9	334.2	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
1.0	砂混じり粘土質シルト-1	17.9	340.2	65938	171955	30	0.5	0.55	0.208
4.0	砂混じり粘土質シルト-2	17.9	355	80550	210062	30	0.5	0.55	0.208
2.0	シルト岩(工学的基盤)	20		Vs=500m/s, Vp=1600m/s					

表2 K-NET 柏崎における表層地盤の有効応力解析<sup>18)</sup>に用いた液状化パラメータ

名称	PHIP	S1	W1	P1	P2	C1
砂-2	28	0.005	5.00	0.5	0.773	1
砂-3	28	0.005	5.00	0.5	0.663	1
シルト質砂	28	0.005	27.92	0.5	0.826	1

### 5. ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデルによる強震動シミュレーション

次に、ガイドライン<sup>1)</sup>に沿って設定したアスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示す。ここでは、震源断層の位置と地震の規模(地震モーメント)は与えられているものとし、それ以後のパラメータ設定を行う。地震モーメントとしては防災科学技術研究所のF-net<sup>19)</sup>による値(9.30×10<sup>25</sup> dyne-cm)を用いる。地震モーメントから短周期レベルを求める式としては式(6)がある<sup>1)</sup>。

$$A=2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (6)$$

ここにAは短周期レベル(dyne-cm/s<sup>2</sup>)、M<sub>0</sub>は地震モーメント(dyne-cm)である。ただし、北陸地方では既往の大地震として2007年能登半島地震が発生しており、その短周期レベルは式(6)から推定される値の約2倍であったことが報告されている<sup>2)</sup>。ガイドラインでは震源特性の地域性を考慮することが推奨されている。そこで、以下のパラメータ設定では、短周期レベルとして、中越沖地震の地震モーメントから推定される値の2倍である2.23×10<sup>26</sup> dyne-cm/s<sup>2</sup>を用いる。

震源断層の総面積S(km<sup>2</sup>)は地震モーメントから次の経験的関係式<sup>1)</sup>で求める。

$$M_0=(S/2.23 \times 10^{15})^{3/2} \quad M_0 \leq 7.5 \times 10^{25} \text{ dyne-cm} \quad (7)$$

$$M_0=(S/4.24 \times 10^{11})^2 \quad M_0 \geq 7.5 \times 10^{25} \text{ dyne-cm} \quad (8)$$

Sは409km<sup>2</sup>となる。アスペリティの総面積S<sub>a</sub>(km<sup>2</sup>)は次の関係式<sup>1)</sup>から求める。

$$S_a=\pi^4 \times (7/4)^2 \times (M_0/A)^2 \times \beta^4/S \quad (9)$$

S<sub>a</sub>は19.1km<sup>2</sup>となる。この面積を前提にして所要の短周期レベル(2.23×10<sup>26</sup> dyne-cm/s<sup>2</sup>)を与えるようにアスペリティ部の地震モーメントを調整するとM<sub>0a</sub>=2.0×10<sup>25</sup> dyne-cmとなる。

次に、アスペリティ部の面積と地震モーメントを複数のアスペリティに割り当てる。ケースとしては、アスペリティが1個の場合(ケース1)、2個の場合(ケース2)、3個の場合(ケース3)の3通りを考える。面積と地震モーメントの各アスペリティへの割り当て方法は唯一ではないが、ここでは2個の場合には2等分、3個の場合には3等分する。すなわちアスペリティ部の地震モーメントの総和が一定となるように分割する。この場合、アスペリティ部の短周期レベルの総和は厳密には一定とならないことに注意されたい。

アスペリティの配置方法も当然ではあるが唯一ではない。ガイドライン<sup>1)</sup>では(詳しい情報がない時には)サ

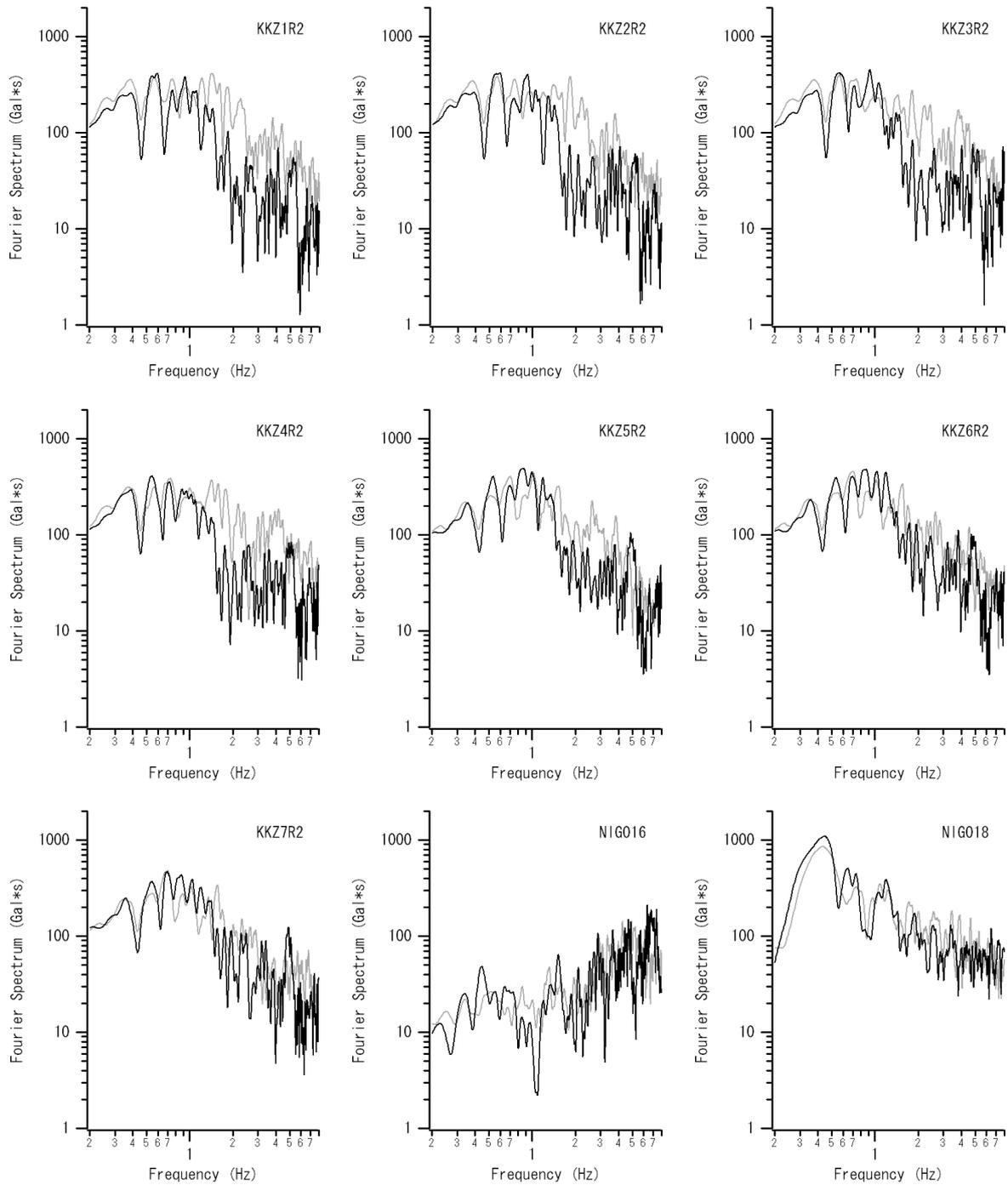


図 14 チューニングされた複数アスペリティモデルによる 1 号機～7 号機の基礎版上および K-NET 寺泊と K-NET 柏崎における加速度フーリエスペクトルの再現状況. 灰色の線が観測結果で黒の線が計算結果.

イトへの影響を考慮して設定することになっている. 本検討では 4. で求めたアスペリティ位置を参考にする. アスペリティが 3 個の時には, それらを, 図 7 のアスペリティ 1-3 の位置に置く. このとき, 各アスペリティの破壊開始点 (☆) とその破壊時刻は 4. と同じものを用いる. アスペリティが 2 個の時には図 7 のアスペリティ 2 と 3 の位置を利用する. アスペリティが 1 個の時には図 7 のアスペリティ 3 の位置を利用する. アスペリティ

内部での破壊伝播速度は S 波速度の 72%<sup>1)</sup>すなわち 2.5km/s とした. 各アスペリティのライズタイムは以下の式<sup>20)</sup>で定めた.

$$\tau = (W_a / V_r) / 4 \quad (10)$$

ここに  $\tau$  はライズタイム,  $W_a$  はアスペリティ幅,  $V_r$  は

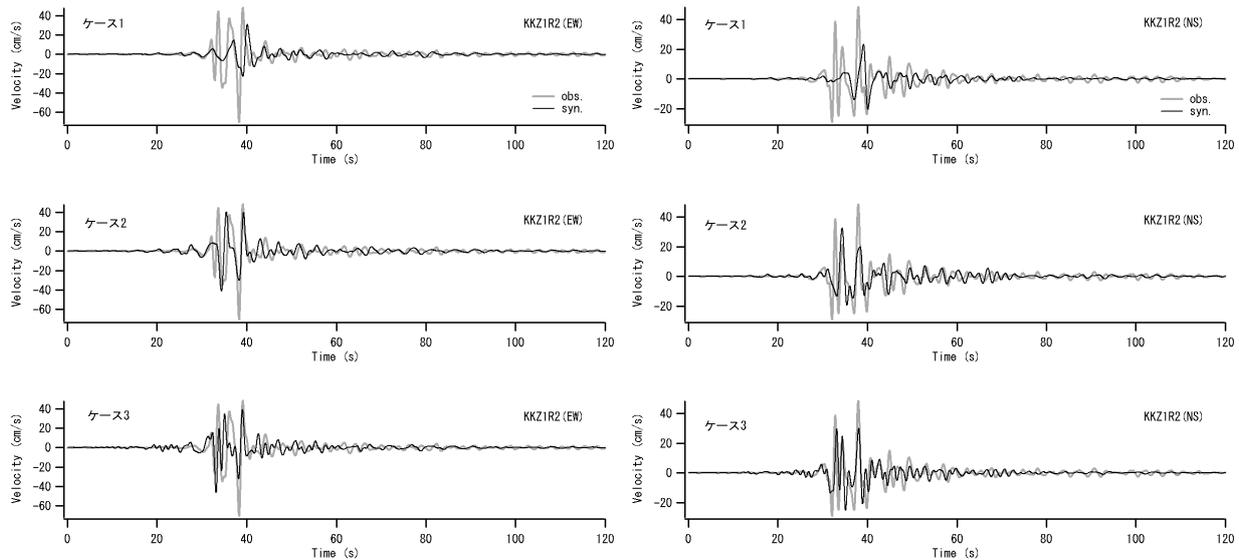


図 15 ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデルによる 1 号機の基礎版上 (KKZ1R2) における速度波形 (0.2-1Hz) の計算結果 (黒) と観測結果 (灰色). 上から順にアスペリティが 1 個, 2 個および 3 個のケース.

破壊伝播速度である.

図 15 に 1 号機基礎版上における速度波形の計算結果を観測結果と比較して示す. アスペリティが 1 個のケースではパルスの振幅が過小評価となっているが, アスペリティが 2 個もしくは 3 個のケースでは比較的観測結果に近い速度波形が得られている. 図 16 には, アスペリティが 3 個の場合について, 1 号機~7 号機の基礎版上および K-NET 寺泊と K-NET 柏崎における加速度フーリエスペクトルの計算結果を観測結果と比較して示す. 短周期成分がやや過小評価されている地点もあるが, 先に紹介した NIG016 と NIG018 における振幅の大幅な違いなど, 観測スペクトルの傾向はよく捉えられている.

## 6. おわりに

本稿では, 刊行予定の設計用入力地震動作成ガイドライン<sup>1)</sup>の内陸地殻内地震への適用事例として, 2007 年新潟県中越沖地震への適用事例を示した. 最初に, この地震の観測波形を再現するようにチューニングされた複数アスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示し, 次に, ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデルによる強震動シミュレーション結果を示した. その際, 震源断層の位置と地震の規模 (地震モーメント) は与えられているものとし, それ以後のパラメータ設定を行った. また, 北陸地方で発生した既往の大地震の短周期レベルを参考にした.

チューニングされた複数アスペリティモデルによる震源近傍での強震動シミュレーション結果は, 当然では

あるが観測結果と良く整合しており, 特に港湾構造物や超高層建物の耐震設計で重要となる 0.2-1Hz の帯域での速度波形の再現精度は良好である.

一方, ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデルによる計算結果に関しては, 2 個もしくは 3 個のアスペリティを設定した場合において, アスペリティサイズのチューニングを行っていないにも関わらず, 0.2-1Hz の帯域での速度波形の再現精度は比較的良好であった. フーリエスペクトルについて見ると, 短周期成分がやや過小評価されている地点もあるが, 先に紹介した NIG016 と NIG018 における振幅の大幅な違いなど, 観測スペクトルの傾向はよく捉えられている. この結果は, 刊行予定のガイドラインが, 地点毎の特性をふまえた設計用入力地震動を策定する上で有用であることを示すものと考えられる.

## お知らせ

本研究で使用したサイト増幅特性データの一部と強震波形計算プログラムは CD-ROM<sup>6)16)</sup>で公開されています.

## 謝辞

東京電力 (株) および独立行政法人防災科学技術研究所に対し, 貴重な強震波形データを使用させていただいたことに対して心より御礼申し上げます. パシフィックコンサルタンツ (株) の佐藤成さんには K-NET 柏崎の表層地盤を対象とした有効応力解析において助力を得ました. ここに記して謝意を表します.

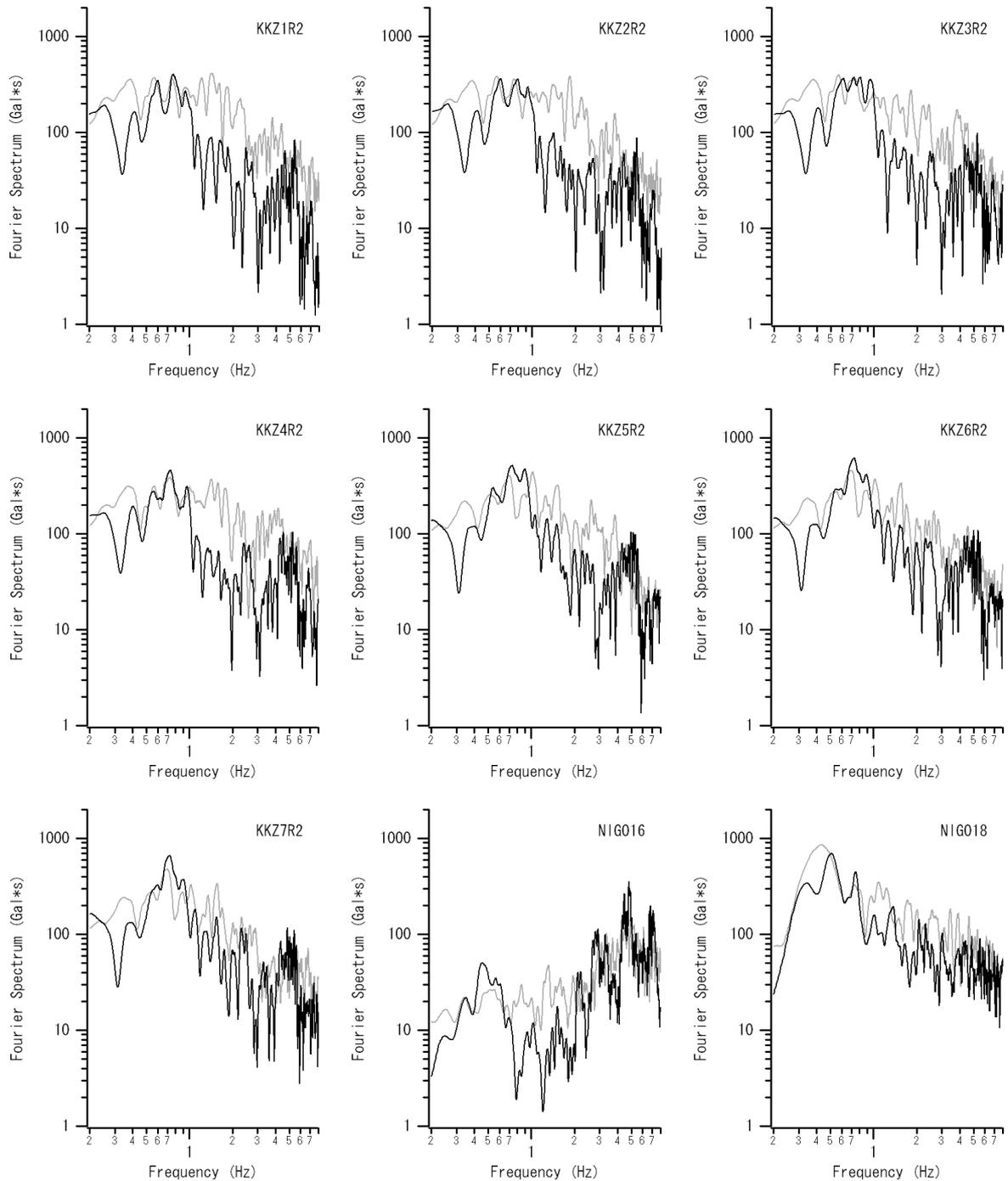


図 16 ガイドラインに沿って設定したアスペリティモデル（アスペリティ 3 個）による 1 号機～7 号機の基礎版上および K-NET 寺泊と K-NET 柏崎における加速度フーリエスペクトルの計算結果（黒）と観測結果（灰色）。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会: 地盤震動研究を活かした設計入力時震動作成ガイドライン, 2009 (刊行予定) .
- 2) 加藤研一, 池浦友則: 2007 年能登半島地震が湧起した大振幅地震動の発生要因, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B-2, pp.761-762, 2008.
- 3) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.514, pp.97-104, 1998.
- 4) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した盆地生成表面波のシミュレーション—九州地方のカルデラを例として—, 土木学会論文集 A, 第 62 巻, 第 4 号, pp.891-905, 2006.
- 5) 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,

第7巻, 第2号, pp.215-234, 2007.

- 6) 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—因果性および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, 2008.
- 7) 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, pp.1865~1894, 1983.
- 8) Brune, J.N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997~5009, 1970.
- 9) Brune, J.N. : Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, p.5002, 1971.
- 10) Esheryby, J.D. : The determination of a elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, Ser. A 241, pp.376-396, 1958.
- 11) 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 第556号, pp.15-24, 2002.
- 12) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集 No.2, B25, 1997.
- 13) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, *地震2*, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 14) 野津厚: 非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.114-122, 2007.
- 15) Kinoshita, S. : Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 16) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 17) Nozu, A. : Rupture Process of the 2007 Chuetsu-oki, Niigata, Japan, earthquake - waveform inversion using empirical Green's functions -, *Earth, Planets and Space* (to appear).
- 18) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, pp.1-15, 1992.
- 19) Fukuyama, E., M. Ishida, S. Hori, S. Sekiguchi and S. Watada : Broadband seismic observation conducted under the FREESIA Project, *Rep. Nat'l. Res. Inst. Earth Sci, Disas. Prev.* 57, pp.23-31, 1996.
- 20) 片岡正次郎, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一 : 想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.15, 2003.