褶曲構造を考慮した解析によるアスペリティ位置と 地震動増幅特性の関連性の検討

－ 柏崎刈羽原子力発電所における新潟県中越沖地震の観測記録に基づく評価 －

EXAMINATION OF RELATION BETWEEN LOCATIONS OF ASPERITIES AND SITE AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF GROUND MOTIONS BY ANALYSIS CONSIDERING THE FOLDED STRUCTURE

－ Estimation based on the strong motion records obtained from the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake
in the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power station －

渡辺 哲史*, 諸井 孝文*, 徳 光 亮一**, 西村 功**, 土方 勝一郎**

Tetsushi WATANABE, Takafumi MOROI, Ryoichi TOKUMITSU,

Isao NISHIMURA and Katsuichirou HIJIKATA

This paper investigates factors causing difference of site amplification in the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station in the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake. To consider 3D response by asperities outside the section of 2D folded structure, FEM analysis is performed with vertical and horizontal incident angles. At Unit 1 above syncline, amplification of 2D model is larger than that of 1D model directly under the point when incidence is closer to vertical as the third asperity. This is due to folds of both first and second boundaries. At Unit 5 above anticline, amplification of 2D model corresponds to that of 1D model.

Keywords : Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station, 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake,

Site amplification, Folded structure, FEM analysis

柏崎刈羽原子力発電所, 2007 年新潟県中越沖地震, サイト増幅, 褶曲構造, FEM 解析

1. はじめに

2007 年 7 月 16 日に新潟県中越沖地震(気象庁マグニチュード Mj6.8, 本報では以後, 中越沖地震と称する)が発生し, 震央から 16km 南方に位置する柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋基礎版で強震記録が観測された¹⁾。土方ら(2010)²⁾はこれらの観測記録の分析を行い, 敷地の南側に位置する 1~4 号機(1 号機側)における地震動レベルが, 1 号機側から 1km 程度しか離れていない 5~7 号機(5 号機側)よりも有意に大きいことを示している。さらに, 基礎版の観測記録から建屋とその周辺地盤の影響を解析的に取り除き, せん断波速度が 0.7km/s 以上の解放基盤表面における地震動(解放基盤波)を評価した。その結果, 観測記録の特徴と同様に, 1 号機側の地震動レベルが 5 号機側よりも大きく, こうした号機間のレベル差は震源インバージョン解析で特定された 3 つのアスペリティ¹⁾³⁾⁴⁾のうちの第 3 アスペリティに対応するパルス(第 3 パルス)による影響が支配的である可能性を指摘した。

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針⁵⁾には, 施設の耐震設計において基準とする地震動(基準地震動 Ss)を策定する際の方針の一つとして, 「地震動評価に当たっては, 地震発生様式, 地震波伝播経路等に応じた諸特性(その地域における特性を含む。)を十分

に考慮すること」が示されている。したがって, 柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動 Ss を策定する上では, 中越沖地震において同一敷地内の地震動に違いをもたらした要因を推定することが重要となる。柏崎地域は褶曲構造が発達した地域であり⁶⁾, 発電所敷地も向斜軸及び背斜軸が貫いている¹⁾ことを踏まえると, 号機間の地震動の違いは震源特性や伝播特性よりもサイト増幅特性によってもたらされている可能性が高いと考えられる。

これに対し植竹ら(2009)⁷⁾は, 発電所及び発電所周辺で実施した地質調査結果に基づいて発電所直下の 2 次元不整形地盤モデルを作成し, 褶曲構造がサイト増幅特性に与える影響を検討している。そこでは, 入射角を変えた 2 次元解析により, 背斜軸上にある 5 号機地点よりも向斜軸上にある 1 号機地点では地震波が集中しやすく, その度合いは鉛直下方からの入射に近いほど大きくなることが把握されている。第 3 パルスの入射角が鉛直に近いというセンブランス解析の結果⁸⁾と合わせると, 号機間の地震動の違いが第 3 アスペリティで顕著になった要因は褶曲構造にあることが推測される。しかしながら, 震源インバージョン解析によるすべり分布を基に特性化された中越沖地震の 3 つのアスペリティ¹⁾³⁾⁴⁾は 2 次元地盤モデルの面外に位置しており, 各アスペリティから放出される地震動のサイト

本論文は, 文献^{16), 17), 18)}の内容に加筆して, まとめたものである。

* (株)小堀鐸二研究所

** 東京電力(株)

Kobori Research Complex Inc.
Tokyo Electric Power Company

増幅特性の違いを詳細に検討するためには、奥行き方向に変化しない2次元地盤構造を解析に用いる場合においても、3次元の地盤応答を的確に再現できるよう合理的な評価が求められる。

そこで本報では、植竹ら(2009)⁷⁾と同様の2次元地盤モデルを用いるが、一方で3次元応答問題を効率的に解くことのできるFEM解析手法⁹⁾を用いることとし、各アスぺリティから放出される地震動のサイト増幅特性の違いを検討するとともに、解放基盤波のシミュレーション解析により地盤モデルの妥当性を検証する。また、妥当性が検討された地盤モデルを用いて増幅特性と入射角の関連性を確認し、なぜ号機間の地震動の違いが第3アスぺリティで顕著になるかを考察する。さらに、1号機地点の大きな増幅特性が褶曲構造のどの部分に起因するかを明らかにするため、褶曲の各境界面の影響や褶曲面の形状に関する感度解析を行う。

2. 2次元不整形地盤のモデル化

図1に発電所と中越沖地震の断層面を示す。震源インバージョン解析によるすべり分布を基に特性化された3つのアスぺリティ位置¹⁾³⁾⁴⁾は、後述の2次元地盤モデルの面外に位置する。

図2に2次元地盤モデルの断面位置を示す。過去の地質調査では敷地内に真殿坂向斜が推定されており¹⁾¹⁰⁾、地盤構造はその向斜軸方向に連続的な褶曲構造を示すものと考えられる。そこで、向斜軸に直交する2次元地盤モデルを1号機側と5号機側で各々作成した。なお、図中のPN方向とPE方向は建屋平面形状を方位基準とした設計上の捉え方であり、それぞれプラントノース方向とプラントイースト方向を表している。また、丸囲み数字は原子炉建屋の位置と号機名を示しており、例えば①は1号機に対応する。

図3に2次元地盤モデルを示す。モデルの上端は解放基盤で、深さが4.8km、幅が7.6kmである。地盤の層序は上位から西山層、椎谷層、上部寺泊層、下部寺泊層、七谷層、グリーンタフ、基盤岩の7層であり、層境界は既往の調査だけでなく、最新の反射法探査やボーリング調査¹⁾を考慮して設定されている。上部3つの層境界が褶曲構造、下部3つが傾斜構造を成している。最も浅い層境界の椎谷層上面では水平位置2km付近に向斜構造が見られ、1号機地点はその上に位置する。一方、5号機地点は背斜上に位置する。なお、次章以降に示す増幅特性は、モデル底面の基準点(2E)に対するモデル上面の各地点の応答を表している。この基準点は一般に観測点の直下に置かれることが多いが、そのように配置すると1号機側断面と5号機側断面の基準点が異なる場所になってしまう。このことを

図1 柏崎刈羽原子力発電所と中越沖地震の断層面

図2 2次元地盤モデルの断面位置

図3 2次元地盤モデル

表1 地盤物性

地層	Vs(km/s)	Vp(km/s)	$\rho(t/m^3)$	Q_0
西山層	0.7	1.9	1.7	50
椎谷層	1.0	2.2	2.1	70
上部寺泊層	1.7	3.3	2.3	110
下部寺泊層	2.0	4.2	2.4	130
七谷層	2.6	4.6	2.5	170
グリーンタフ	2.6	4.6	2.5	170
基盤岩	3.1	5.2	2.6	210

Q 値は振動数依存とし、 $Q=Q_0f^{1.0}$

避けるために、ここでは基準点の位置を向斜軸からの距離もしくは海側の端からの距離が両断面で共通となるように設定した。

地盤物性を表 1 に示す。これらは敷地における過去の鉛直アレイ観測記録を用いた水平／上下スペクトル振幅比の逆解析に基づき、各地層で一律と設定されており、深さ依存等は考慮されていない。

発電所の観測記録から求めた中越沖地震における第 3 パルスの周期である約 0.6 秒(1.67Hz)を十分に評価できるように、FEM 解析の最大振動数は 5Hz とし、S 波 1 波長に対し 5 分割程度で要素を作成する。解析手法は、モデルの底面に粘性境界と両側面にエネルギー伝達境界を接続した振動数領域の FEM 解析⁹⁾を用いる。

3. 中越沖地震のシミュレーション解析

(1) 各アスペリティからの S 波入射による増幅特性

図 1 と図 2 に示したように、中越沖地震のアスペリティは 2 次元地盤モデルの面外に位置するため、震源断層からの入射場を平面波で近似した場合、斜め入射角 θ_v のみでなく、方位入射角 θ_h を有することになる。ここでは、3 つのアスペリティについて、方位入射角を有する S 波斜め入射時の応答特性を調べる。

入射角は、特性化された各アスペリティの中心位置から、表 2 のように設定する。同表には、図 4 のように算定した断面内の見かけの入射角も併記している。特性化されたアスペリティを小領域に分割し、各小領域の中心からの見かけの入射角を算定したうえで、それらをアスペリティ内のすべりを均一と考えて平均しても、表 2 の値と同様となる。これより、アスペリティの中心位置を地震動が放出される代表位置として想定した。なお、特性化された各アスペリティの中心位置は、震源インバージョン解析による各アスペリティのすべりのピーク位置にもほぼ対応する¹⁾³⁾⁴⁾。表 2 で 3 つのアスペリティを比較すると、第 3 アスペリティからの見かけの入射角が最小であり、最も鉛直入射に近い。

図 5 に、各アスペリティからの S 波入射に対する断面直交方向の増幅特性を示す。横軸はモデル上面での水平位置、縦軸は振動数であり、コンターの色は、モデル底面の基準点(2E)に対する増幅倍率を表している。また、1 号機地点および 5 号機地点を点線で示す。方位角を有する解析では 3 次元の地盤応答となるため、SH 波入射だけでなく SV 波入射でも断面直交方向に応答を生じるが、図には、同一アスペリティの断面直交方向について、増幅倍率が大きくなる入射条件のみを示している。例えば、第 3 アスペリティは断面直交方向に近い位置からの入射となるため、断面直交方向の増幅倍率は SV 波入射に対して大きく、SH 波入射に対してはあまり応答しない。

水平位置約 2km にある向斜付近で増幅縞が生じる傾向は、断面やアスペリティの違いによらず、共通している。増幅縞と 1 号機地点の位置を比較すると、第 1 アスペリティや第 2 アスペリティからの入射では増幅縞が 1 号機地点からやや外れているが、これらに比べ第 3 アスペリティからの入射では増幅縞と 1 号機地点がほぼ重なっている。一方、5 号機地点は、全てのアスペリティからの入射による増幅縞に対しておよそ 1km 離れた位置にあり、全ての振動数範囲で増幅の影響を受けにくいことが分かる。図 5 には断面直交方向のみを示したが、断面平行方向についても同様の特性を示すことを別途確認している。

表 2 各アスペリティからの入射角

アスペリティ	斜め入射角 θ_v	方位入射角 θ_h	断面内の 見かけの入射角 θ_v'
第 1	46°	150°	27°
第 2	28°	95°	28°
第 3	45°	15°	15°

図 4 断面内の見かけの入射角

(2) 1 号機地点のシミュレーション解析

次に、アスペリティ毎に求めた増幅特性と 5 号機地点の解放基盤波を用いて、1 号機地点の解放基盤波のシミュレーション解析を行う。解放基盤波と増幅特性、モデル底面の基準点への入射波の関係を下式で示す。なお、添え字の i ($i=1$: 1 号機地点, 2 : 5 号機地点) は地点を表す。

$$\begin{Bmatrix} U_{PN-i} \\ U_{PE-i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{PN-SV-i} & S_{PN-SH-i} \\ S_{PE-SV-i} & S_{PE-SH-i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{SV0} \\ U_{SH0} \end{Bmatrix}, (i=1,2)$$

式中、解放基盤波: PN 方向 (図 2 参照) U_{PN-i} , PE 方向 U_{PE-i}

SV 波入射時の増幅特性: PN 方向 $S_{PN-SV-i}$, PE 方向 $S_{PE-SV-i}$

SH 波入射時の増幅特性: PN 方向 $S_{PN-SH-i}$, PE 方向 $S_{PE-SH-i}$

モデル底面の基準点への入射波(2E): SV 波 U_{SV0} , SH 波 U_{SH0}

なお、両方のモデル底面への入射波は、簡単のために振幅を共通とし、時間差のみを考慮した。時間差は二断面間の距離を入射角に応じた基盤岩での断面直交方向の見かけ速度で除して求めた。

ここで、5 号機地点の解放基盤波をコントロール波とする。すると、5 号機地点の増幅特性は既知なので、モデル底面への入射波が求められる。さらに、それらと既知である 1 号機地点の増幅特性から 1 号機地点の解放基盤波が計算できる。アスペリティによる入射条件の違いを考慮するために、5 号機地点の解放基盤波を時間軸上で 3 分割して、順に第 1～第 3 アスペリティに対応させる。

このように評価した 1 号機地点の速度波形のシミュレーション結果を図 6 に示し、コントロール波に用いた 5 号機地点の解放基盤波も参考として併記する。ここで底面入射波 U_{SV0} , U_{SH0} は、3 つのアスペリティに対してそれぞれ SV 波と SH 波の計 6 波 (断面間の違いを考慮すると計 12 波) が求められているが、図 6 では紙面の都合上割愛した。なお、解放基盤波、解析波ともに、解析振動数に合わせて 0～5Hz のバンドパスフィルターを施している。1 号機地点の解析波は、振幅、位相とも解放基盤波と概ね対応しており、第 3 アスペリティによる波形後半のパルスが 5 号機地点に比べて大きくなる傾

図5 各アスペリティからのS波入射に対する断面直交方向の増幅特性

図6 1号機地点の速度波形のシミュレーション結果

向も良好に再現されている。これらの結果に見られる再現性により、用いた地盤モデルの妥当性が確認できた。

4. 増幅特性と入射角の関連性

植竹ら(2009,2008)は地震波の入射角が鉛直に近いほど1号機地点の地震動が5号機地点より大きくなり⁷⁾、断層面と敷地の位置関係により第3パルスの波はこの特徴を含んでいる⁸⁾と述べている。先の表2に示したとおり、第3アスペリティからの見かけの入射角は他のアスペリティに比べて鉛直に近く、これは植竹ら(2008)⁸⁾の指摘に整合する。

そこで、増幅特性と入射角の関連性をさらに検討するために、2次元断面内(方位入射角 $\theta_h=90^\circ$)で斜め入射角 θ_v をパラメータとした解析を行う。図7に、リッカー波をSV波入射した場合の断面平行方向の最大応答値分布を示す。横軸はモデル上面での水平位置である。なお、リッカー波の中心周期は、中越沖地震における第3パルスのパルス幅を参考に0.6秒とする。1号機側断面の鉛直入射時($\theta_v=0^\circ$)には、西山層の向斜付近で局所的に増幅が大きくなり、この増幅幅は1号機地点の位置に重なる。斜め入射角が大きくなる

につれて、増幅率は陸側に移動し、1号機地点の位置から離れる。5号機側断面でも同様の傾向が見られ、斜め入射角が大きいほど増幅率は陸側に移動するが、いずれの場合でも5号機地点の増幅率は小さい。

さらに、各号機地点の増幅特性に対して褶曲構造がどれくらい影響しているのかを把握するため、褶曲構造を考慮した2次元地盤と、各号機地点の直下の地層を平行成層とした1次元地盤で応答を比較する。図8に、2次元断面内のSV波鉛直入射に対する断面平行方向の増幅特性を示す。特定の狭い周期帯に着目すると増幅特性の山や谷によって2次元地盤と1次元地盤の大小関係は一定でないが、概ね以下の傾向が認められる。1号機地点では褶曲構造の影響が表れ、周期1秒よりも短周期側で2次元地盤の応答が1次元地盤の応答よりも大きい。2次元地盤の向斜軸上で1次元地盤よりも応答が大きくなる特性は、正弦波形状の層境界を有する理想化されたモデルによる解析結果^{11),12)}と同様であり、向斜構造の焦点効果により入射波のエネルギーが増大したためと考えられる。一方、5号機地点では2次元地盤と1次元地盤の応答は同等である。

以上より、第3アスペリティで1号機地点が大きな増幅を示したのは、第3アスペリティが3つのアスペリティのなかで最も鉛直入射に近いことに加え、1号機地点が褶曲構造による波動の集中の影響を受けやすかったためであり、このことが2次元地盤と1次元地盤の比較で確認できた。

ところで、上記の検討では入射条件として平面S波を仮定していた。この仮定が褶曲構造による1号機地点への波動の集中に過大な評価を与えている可能性も考えられる。そこで、ここではこのような解析上の影響について検討するため、地盤モデルを震源まで拡張して球面波入射を考慮した解析結果と比較する。

図7 2次元断面内でリッカー波をSV波入射した場合の断面平行方向の最大応答値分布

用いる地盤モデルは図3に示した地盤モデルの拡張形であるが、側方については左右境界位置の地層を成層構造として設定し、底部以深については基盤岩が連続するものとする。奥行き方向については、平面波入射の解析に合わせて、各断面を独立に連続させる。すなわち、地盤モデルは1号機側と5号機側の2種類存在する。震源は第3アスペリティ中心位置の点震源とし、文献1),3)に基づき、メカニズムは走向角 35°、傾斜角 35°、すべり角 90°、すべり速度時間関数はライズタイム 0.5 秒の三角形パルスを設定する。ただし、モデル拡張に伴う計算効率を考慮して、ここでの球面波入射の解析手法は3次元差分法^{13) 14) 15)}を用いる。

図9に、5号機地点に対する1号機地点の応答比率を入射条件で比較する。平面波入射は図5に示したFEM解析による各号機地点の増幅特性の比を、球面波入射は3次元差分法による各号機地点の速度波形のフーリエスペクトル比を示しており、それぞれにバンド幅 0.2Hz の Parzen Window を施してある。なお、平面波入射についてはSH波とSV波の双方の寄与が考えられるが、ここでは増幅倍率が大きくなる入射条件のみを対象とする。平面波入射と球面波入射の結果を比較すると、両者は概ね対応している。この結果より、平面波入射の仮定が褶曲構造による1号機地点への波動の集中に及ぼす影響は過大評価とはなっていないことが確認できた。

図8 2次元断面内のSV波鉛直入射に対する断面平行方向の増幅特性

図9 5号機地点に対する1号機地点の応答比率の入射条件による比較（第3アスペリティからの入射）

5. 褶曲構造の感度解析

褶曲の各境界面の影響や褶曲面の形状に関する感度解析を行い、1号機側の大きな増幅特性が褶曲構造のどの部分に起因するかを明らかにする。

(1) 褶曲の各境界面の影響に関する検討

図10に解析モデルを示す。図3に基本モデルとして示したモデルAでは、地質調査に基づいて褶曲面の位置を椎谷層上面、上部寺泊層上面、下部寺泊層上面の3面としていた。これに対し、椎谷層上面のみに褶曲面を考慮したモデルB、上部寺泊層上面のみに褶曲面を考慮したモデルC、椎谷層上面と上部寺泊層上面に褶曲面を考慮したモデルDを設定する。

図11に1号機地点の増幅特性を各モデルで比較する。入射条件および検討方向は、第3アスペリティからのSV波入射に対する断面直交方向である。椎谷層上面のみに褶曲面を考慮したモデルBや上部寺泊層上面のみに褶曲面を考慮したモデルCでは、1号機地点の増幅はモデルAよりも小さい。しかし、椎谷層上面と上部寺泊層上面の2つに褶曲面を考慮したモデルDでは、1号機地点の増幅はモデルAと同程度に大きくなる。すなわち、1号機地点の増幅は椎谷層上面と上部寺泊層上面の2つの褶曲面によって生じており、上部寺泊層以浅の構造による影響が大きいものと考えられる。これに対

し、下部寺泊層上面における層境界面のインピーダンス比はそれより上部に比べて小さいため、褶曲面での波面の屈折は小さくなっている。そのため下部寺泊層以深の地盤構造は1号機地点の局所的な増幅に大きな影響を及ぼさないと考えられる。これは、のちほど示す図14①のスナップショットでも確認することができる。

(2) 褶曲面の形状に関する検討

図12に解析モデルを示す。基本モデルであるモデルAに対し、褶曲面の形状を段階的に平滑化したモデルEとモデルFを設定する。

図13に1号機地点の増幅特性を各モデルで比較する。入射条件および検討方向は、第3アスペリティからのSV波入射に対する断面直交方向である。平滑化が小さいモデルEの場合、1号機地点の増幅はモデルAと変わらない。平滑化が大きいモデルFの場合、1号機地点の増幅はモデルAに比べて若干小さくなるが、ほぼ同等である。向斜の凹んだ部分を局所的に埋めても、1号機地点が背斜に挟まれた向斜上にあるという大局的な位置関係は変わらないため、1号機地点の増幅への影響が小さかったと考えられる。

(3) 1号機側断面の波動伝播特性

上記の検討により、1号機地点の増幅に対しては、椎谷層上面と上部寺泊層上面の褶曲の影響が大きいと考えられる。図14に、中心

図10 褶曲の各境界面の影響に関する感度解析モデル

図12 褶曲面の形状に関する感度解析モデル

図11 1号機地点の増幅特性に対する
褶曲の各境界面の影響
(第3アスペリティからのSV波入射、
断面直交方向)

図13 褶曲面の形状による
1号機地点の増幅特性の差異
(第3アスペリティからのSV波入射、
断面直交方向)

周期 0.6 秒のリッカー波を入射したときの 1 号機側断面のスナップショットを示し、その影響を確認する。地盤は基本モデルであるモデル A、応答は第 3 アスぺリティからの SV 波入射に対する断面直交方向であり、図 2 に示したように斜め入射角と方位入射角の両方を考慮した 1 号機側断面の FEM 解析を行っている。なお、図中の秒数はモデル底面に設定した基準点からの伝播時間を表している。以下に結果をまとめる（丸囲み数字は図に対応）。

①下部寺泊層上面の褶曲を通過しても、上部寺泊層までは平面波の

形状をほぼ保ったまま波動が伝播する。

②上部寺泊層上面の褶曲を通過すると、向斜構造の中心部に波動が集中する。

③椎谷層上面の褶曲を通過すると、1 号機地点の直下で波動の集中度が増す。

④波動の集中はそのまま 1 号機地点へ伝播する。

⑤1 号機地点は大きな増幅を示す。

図 14 リッカー波入射時の 1 号機側断面のスナップショット
(第 3 アスぺリティからの SV 波入射，断面直交方向)

6. まとめ

本報では、はじめに、柏崎刈羽原子力発電所の褶曲構造を考慮した2次元地盤モデル(1号機側断面と5号機側断面)を用いて、FEMによる3次元波動場の応答解析を行い、2次元地盤モデルの面外に位置する2007年中越沖地震の3つのアスペリティから放出される地震動のサイト増幅特性の違いを検討するとともに、解放基盤波のシミュレーション解析により地盤モデルの妥当性を検証した。結果を以下にまとめる。

- ①向斜付近で増幅縞が生じる傾向は、断面やアスペリティの違いによらず、共通している。
- ②第1, 第2アスペリティからの入射では増幅縞が1号機地点からやや外れているが、第3アスペリティからの入射では増幅縞と1号機地点がほぼ重なっている。一方、5号機地点は全てのアスペリティからの入射による増幅縞に対して離れた位置にあり、全ての振動数範囲で増幅の影響を受けにくい。
- ③3つのアスペリティで見かけの入射角を比較すると、第3アスペリティからの入射角が最も鉛直入射に近い。

次に、妥当性が検討された地盤モデルを用いて、2次元断面内で斜め入射角をパラメータとした解析を行い、増幅特性と入射角の関連性を検討した。また、各号機地点の増幅特性に対する褶曲構造の影響を把握するため、褶曲構造を考慮した2次元地盤と、直下の地層を平行成層とした1次元地盤で応答を比較した。さらに、1号機地点の大きな増幅特性が褶曲構造のどの部分に起因するかを明らかにするため、褶曲の各境界面の影響や褶曲面の形状に関する感度解析を行った。結果を以下にまとめる。

- ④1号機側断面の増幅縞は、鉛直入射時には1号機地点の位置に重なり、断面内の斜め入射角が大きくなると1号機地点の位置から離れる。一方、5号機側断面の増幅縞は、斜め入射角によらず、5号機地点との間に距離がある。
- ⑤1号機地点は褶曲構造の影響により、直下の1次元地盤よりも応答が大きくなる。一方、5号機地点は褶曲構造の影響が小さく、直下の1次元地盤と同等の応答となる。
- ⑥1号機地点の増幅に対しては、椎谷層上面と上部寺泊層上面の褶曲の影響が大きい。

以上より、2007年新潟県中越沖地震において、第3アスペリティで1号機地点が大きな増幅を示したのは、第3アスペリティからの見かけの入射角が3つのアスペリティのなかで最も鉛直入射に近く、かつ1号機地点が椎谷層上面と上部寺泊層上面の褶曲による波動の集中の影響を受けやすい位置にあるためと推定される。

謝辞

本論文を作成するに当たり、東京理科大学教授・永野正行博士から有益な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 東京電力：柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書，経済産業省原子力安全・保安院，2008.9
- 2) 土方勝一郎，西村功，水谷浩之，徳光亮一，真下貢，田中信也：2007年新潟県中越沖地震の地震動特性，日本建築学会構造系論文集，第653号，pp.1279-1288，2010.7
- 3) 芝良昭：2007年新潟県中越沖地震の震源過程の解明と広帯域強震動評価，

電力中央研究所報告，研究報告N08007，2008.11

- 4) Ryoichi Tokumitsu, Masatomo Kikuchi, Isao Nishimura, Yoshiaki Shiba, and Shiya Tanaka : Analysis of the strong motion records obtained from the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake and determination of the design basis ground motions at the Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Plant (Part 1: Outline of the strong motion records and estimation of factors in large amplification), 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Division 4, Paper 3189, 2009.8
- 5) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，2006.9.19
- 6) 小林巖雄，立石雅昭，吉村尚久，上田哲郎，加藤碩一：柏崎地域の地質，地質調査所，1995
- 7) 植竹富一，徳光亮一，西村功，土方勝一郎：柏崎刈羽原子力発電所の古い褶曲構造が地震動特性に与える影響—差分法を用いた波動伝播評価—，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造 II，pp.1017-1018，2009.8
- 8) 植竹富一，徳光亮一：2007年新潟県中越沖地震の震源近傍強震記録に見られたパルス波の伝播方向，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造 II，pp.1017-1018，2009.9
- 9) 永野正行，源栄正人：任意方位角を有する平面波斜め入射に対する2次元構造物の応答解析，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.67-76，1995.8
- 10) 岸清，宮脇理一郎：新潟県柏崎平野周辺における鮮新世〜更新世の褶曲形成史，地学雑誌，第105巻，第1号，pp.88-112，1996
- 11) 菅原長，源栄正人，釜田正毅：褶曲構造を有する不整形地盤の波動伝播特性解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造 II，pp.435-436，1991.9
- 12) 神田克久：不整形な層境界を有する地盤の増幅特性，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp.119-126，1998.12
- 13) 永野正行：グリッド間隔と時刻刻みを可変とする3次元差分法を用いた2000年鳥取県西部地震時の神戸地域における強震動，日本建築学会構造系論文集，第580号，pp.43-50，2004.6
- 14) 渡辺哲史，永野正行：2003年十勝沖地震時における苫小牧地域の地震動シミュレーション解析，日本地震工学会大会2004 梗概集，pp.314-315，2005.1
- 15) 渡辺哲史，永野正行：2007年能登半島地震時の異なる震源モデリングによる震源近傍の強震動評価，日本地震学会講演予稿集2007年度秋季大会，p.169，2007.10
- 16) Tetsushi Watanabe, Takafumi Moroi, Masayuki Nagano, Ryoichi Tokumitsu, Masatomo Kikuchi, and Isao Nishimura : Analysis of the strong motion records obtained from the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake and determination of the design basis ground motions at the Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Plant (Part 2: Difference of site amplification based on the 2D FEM analysis of the folded structure), 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Division 4, Paper 3190, 2009.8
- 17) 徳光亮一，土方勝一郎，西村功，渡辺哲史，諸井孝文：柏崎刈羽原子力発電所における不整形地盤の2次元FEM解析 その1 褶曲構造によるサイト増幅の違いと新潟県中越沖地震のシミュレーション解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造 II，pp.1019-1020，2009.8
- 18) 渡辺哲史，諸井孝文，土方勝一郎，西村功，徳光亮一：柏崎刈羽原子力発電所における不整形地盤の2次元FEM解析 その2 褶曲構造の感度解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 構造 II，pp.1021-1022，2009.8

(2010年8月6日原稿受理，2010年10月8日採用決定)