

新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所での 地震動増幅特性の検討

日比野 憲太¹・堤 英明²・蛭沢 勝三³

¹ 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部 地震動・津波グループ 主任研究員 博士（工学）

（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

² 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部 地震動・津波グループ 主席調査役

（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

³ 独立行政法人 原子力安全基盤機構 耐震安全部長 博士（工学）

（〒105-0001 東京都港区虎ノ門4-3-20 神谷町MTビル）

1. はじめに

2007年7月16日に柏崎刈羽原子力発電所近傍で、新潟県中越沖地震（マグニチュード6.8）が発生した。同地震によって、原子炉建屋基礎版上では旧耐震設計審査指針¹⁾の基準地震動 S_2 に対する設計応答の約2倍の加速度応答が観測され、解放基盤における地震動も S_2 を大幅に超えたものと推定されている。この地震動に対し、同発電所における安全上重要な設備の「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の機能は正常に働き、安全は確保された。しかし、「なぜ、 S_2 を大きく上回る地震動が観測されたのか?」、その原因究明が緊急かつ重要課題となっている。

独立行政法人 原子力安全基盤機構では、地震後直ちに上述の原因究明に取り組み、ほぼその全容を解明した。また、それらの成果を経済産業省 資源エネルギー庁 原子力安全・保安院の公開委員会²⁾や国際原子力機関（IAEA）主催の国際会議で発表³⁾した。本論文は、上述の原因究明の過程をまとめ、その内容を整理したものである。

著者らは、発電所の敷地内で観測された地震動⁴⁾や他研究機関の公開情報⁵⁾、新潟県中越地震に係わる既往の研究結果⁶⁾を分析し、観測地震動に含まれる振幅の大きなパルス波が全体の地震動レベルに大きな影響を及ぼしていること、敷地周辺の深部地盤が大きな褶曲を伴う不整形な構造となっていることを把握した。これらの分析結果に基づき、震源特性と深部地盤での地震動伝播特性に着目すると共に、特に深部地盤での地震動の伝播過程が重要であるこ

とを認識して敷地周辺の三次元深部地盤構造モデルを作成し、理論的手法に基づく地震動伝播解析を行い、パルス波の増幅原因に係わる解析的な検討を行った。

2. 地震・地震動の分析

2.1 柏崎刈羽原子力発電所の概要

図-1に発電所敷地内の各号機の配置を示す。同発電所は沸騰水型（BWR）の発電所で、7つの炉から構成されている。敷地周辺の地質・地盤は、地表から解放基盤までの浅部地盤と、解放基盤から地震基盤までの深部地盤からなる。特に、深部地盤は大きな褶曲構造を呈し、堆積層が厚く、三次元的な不整形構造を有している。

2.2 観測地震動の特徴

本地震は、マグニチュード6.8、震源深さ約10km、敷地から約14kmの震央距離位置で発生した。

図-2に建屋基礎盤上で観測された地震動の加速度時刻歴波形を、南側から各号機の配置順に示す。こ

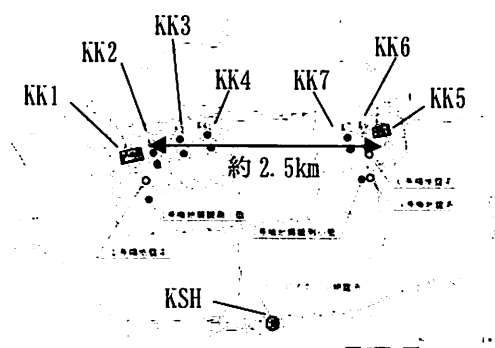


図-1 柏崎刈羽原子力発電所の配置状況
（文献4に加筆）

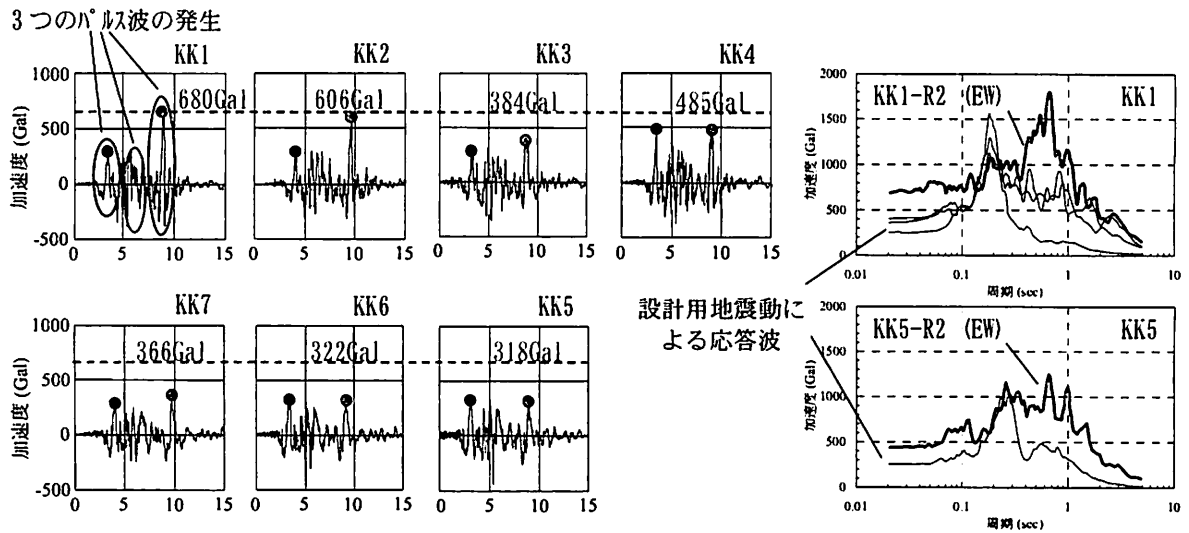


図-2 原子炉建屋基礎版上の観測波形（EW方向）の特徴（文献4を整理）

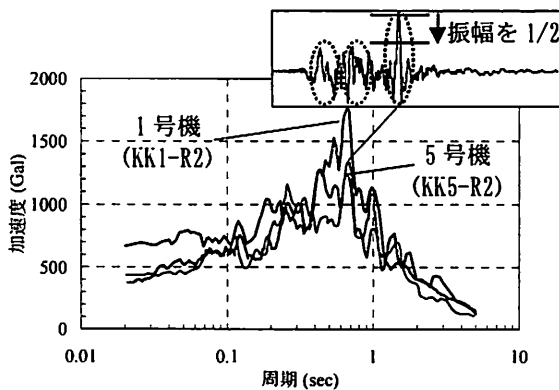


図-3 第3パルス波が加速度応答スペクトルに及ぼす影響

これらの波形には、いずれも3つのパルス波が含まれ、特に1号機では、第3のパルス波が顕著に増大していることが特徴である。また、全号機の観測地震動が旧耐震設計審査指針（平成18年9月に新耐震指針に改定）に基づく設計応答（275Gal）を上回ると共に、1号機の最大加速度は、第3のパルス波の増大により、約2.5km離れた5号機の約2倍の大きさとなった。

第3パルス波で最大の加速度（680Gal）が観測された1号機と第3パルス波の加速度が最も小さい（318Gal）5号機の加速度応答スペクトルを図-3に示す。また、同図には、1号機の第3パルス波の振幅を1/2した場合のスペクトルを合わせて示す。これらのスペクトルの比較から、1号機の第3パルス波の振幅を1/2にしたスペクトルは大きく低減し、5号機とほぼ同レベルとなっており、1号機観測波形の第3パルス波が、応答スペクトル全体のレベルを押し上げていることが分かる。

2.3 地震・地震動の分析の観点と分析方法

2.2節の観測地震動の特徴を踏まえ、分析の観点として、各号機の地震動の最大加速度が設計応答を大きく上回った原因、特に1号機観測波形の第3パルス波が大きく増幅した原因と、1号機と5号機で第3

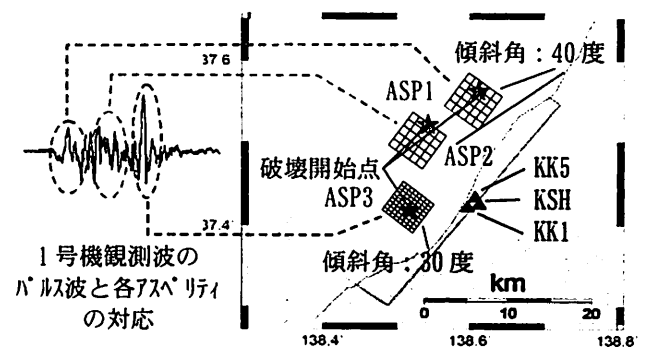


図-4 震源震源モデル

表-1 震源断層モデルの諸元

アスペリティ	断層パラメータ	
	地震モーメント (Nm)	応力降下量 (Mpa)
1, 2	1.69×10^{18}	23.7
3	1.02×10^{18}	19.8

パルス波の振幅が大きく異なった原因に着目した。

分析方法として、本地震の震源特性と深部地盤の地震動伝播特性に着目し、パルス波の生成と成長の過程を中心に分析した。震源特性の分析では、本地震に対して、余震分布や観測記録などから推定されている断層モデルの震源パラメータや破壊性状などから特性を検討した。また、地震動伝播特性の分析では、深部地盤の不整形性を考慮した三次元地下構造モデルを作成して地震動伝播解析を行い、水平成層地盤による解析と比較し、深部地盤の影響を検討した。

3. 震源特性の影響の分析

3.1 震源断層モデルの設定

震源断層モデルは、余震分布に基づき南東傾斜⁵⁾とし、当該発電所の観測波形から3つのアスペリティが破壊したとする入倉ら⁷⁾および釜江ら⁸⁾が提案し

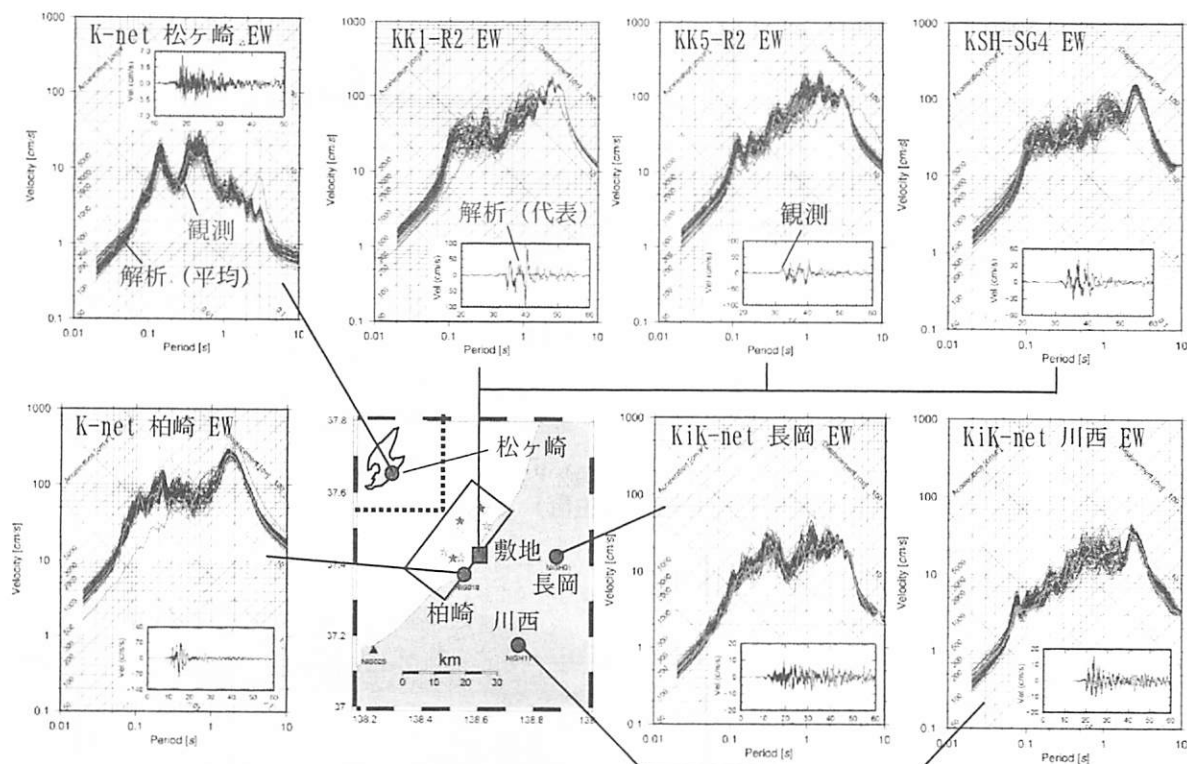


図-5 観測スペクトルと震源モデルによるスペクトルの比較

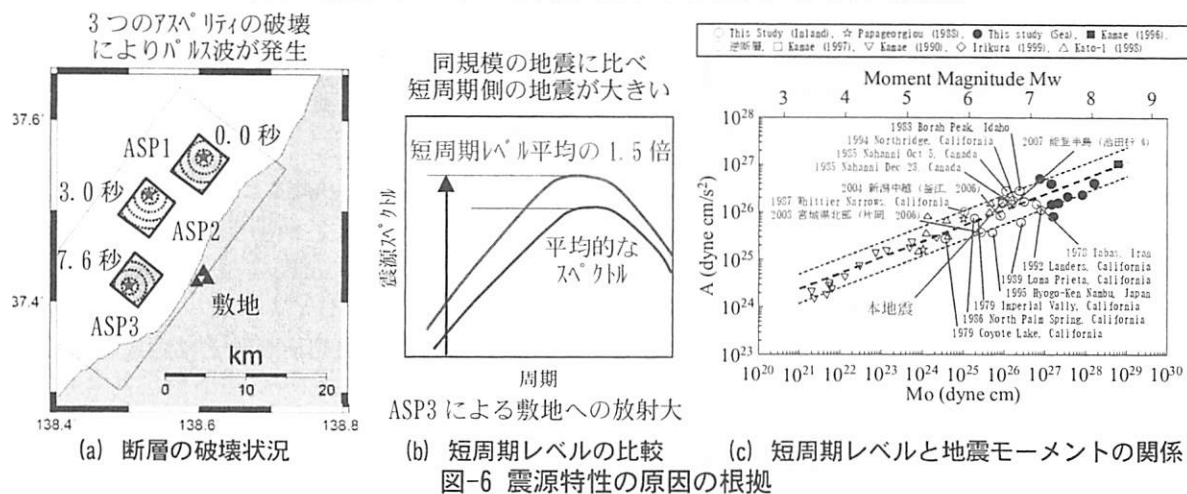


図-6 震源特性の原因の根拠

たモデルを参考に設定した。設定した断層モデルとパラメータを図-4および表-1に示す。

3.2 震源断層モデルの妥当性の検証

(1) 検証方法

3.1節で設定した震源断層モデルの妥当性を検証するために、経験的グリーン関数により震源周辺の強震動解析を行い、それらの結果と観測記録を比較して整合性を検討した。本検証では、震源周辺で適切な経験的グリーン関数（要素地震波）が得られている発電所敷地内の1、5号機（基礎盤上）、サービスホール（地中）の3箇所、K-netとKiK-netサイト4箇所（柏崎、長岡、川西、佐渡島の松ヶ崎）の併せて7箇所を解析対象とした。

(2) 検証結果

各観測点の強震動解析から得られた加速度応答ス

ペクトルと時刻歴波形を、観測記録と合わせて図-5に示す。震源周辺の各観測記録のスペクトルと解析結果はいずれもほぼ整合し、時刻歴波形も調和的であることから、設定した震源断層モデルは概ね妥当であると判断した。

3.3 震源特性の影響の分析

3.2節の震源断層モデルと強震動解析結果から、各号機の地震動の増幅要因となった震源特性として、以下が推定される。① 各号機の観測波形に見られる3つのパルス波は、3つのアスペリティの破壊によって生成され、特に図-6(a)に示すようなマルチハイボセンター型の破壊伝播形式（各アスペリティに破壊が伝播後、それぞれの破壊開始点から同心円状に破壊が伝播）により、パルス波が発生した一要因と推定される。② 図-6(b)、(c)に示すように、本

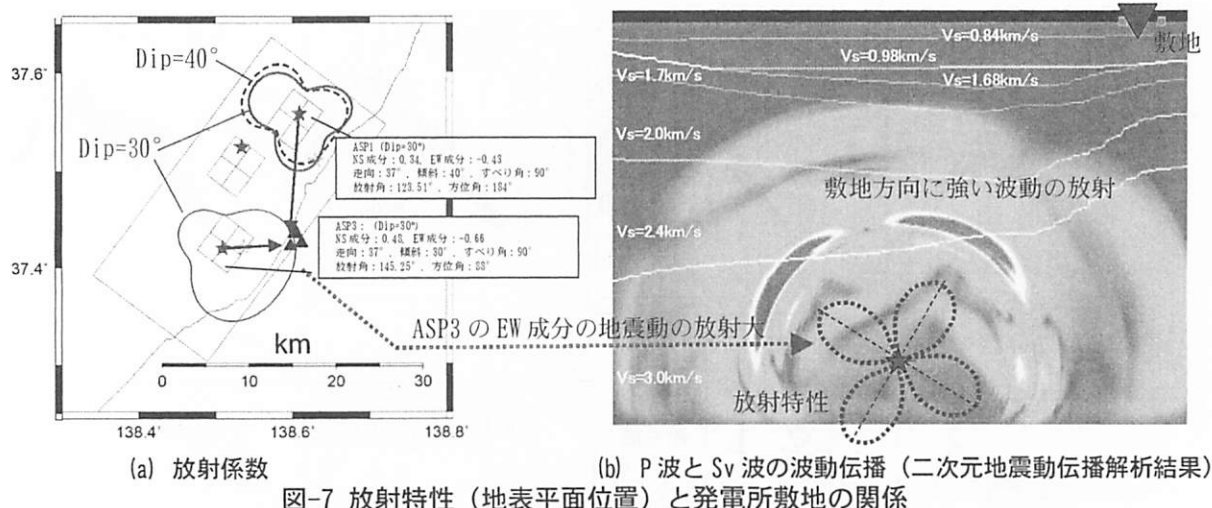
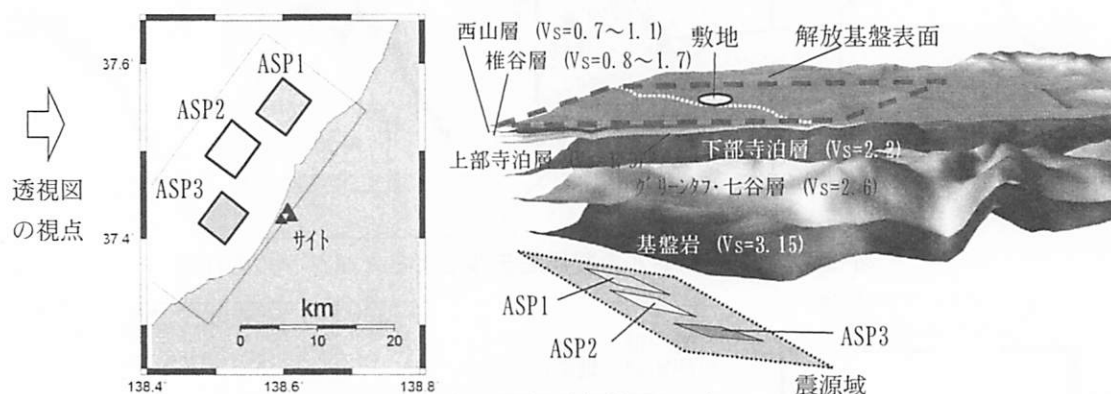


図-7 放射特性（地表平面位置）と発電所敷地の関係



地震と既往の被害地震について整理した地震モーメントと短周期レベルの関係⁹⁾を比較すると、本地震の短周期レベルは、同規模の地震（M6.8）の平均値よりも1.5倍程度大きい。③ 図-7 (a) に示した第1と第3アスペリティの方位毎の放射特性から、発電所敷地はアスペリティからの放射が大きな方向（図中だるま形の曲線の膨らみが大きい方向）にある。また、図-7 (b) に示す第3アスペリティと敷地を横断する断面方向の放射特性から、敷地は特に第3アスペリティから強い地震動が放射される位置にある。

4. 深部地盤の地震動伝播特性の影響の分析

4.1 発電所敷地周辺の深部地盤構造

(1) 深部地盤構造モデルの作成

3章の震源断層からの地震動伝播特性を評価するための深部地盤構造モデルを以下の手順で作成した。

- ・第1ステップ：ボーリング、物理探査、地質、活断層などのデータを整理・補完して、地質構造断面図を作成する。
- ・第2ステップ：各地質構造断面図から各地層境界の深度を空間的に補間し、各地層の上面深度のコンター図を作成する。
- ・第3ステップ：旧石油公団によるVSP検層データなどからVpと深度の関係を推定し、さらに、

KiK-netおよびK-netなどのデータからP波とS波の関係を推定して、初期モデルとして各地層の物性値（Vp、Vs、密度など）を設定する。

- ・第4ステップ：H/Vスペクトルや観測点間の地震波の走時など観測地震動と整合するように、第3ステップで作成した深部地盤構造モデルの物性値をチューニングして、最終的な深部地盤構造モデルを作成する。

本分析で作成した深部地盤構造モデルは、旧石油公団の基礎試験報告書¹⁰⁾や基礎物理探査報告書¹¹⁾などを用いて、2004年の新潟県中越地震の震源周辺70km四方を対象に作成したモデル⁶⁾をベースに、発電所敷地や本地震の震源周辺の地下構造をより詳細化して作成した。詳細化には東京電力による調査データ¹²⁾や観測記録¹³⁾を用いた。

(2) 深部地盤構造の特徴

本分析のために詳細化した、三次元深部地盤構造モデルを図-8に示す。なお、モデルの視点は海側から敷地を俯瞰したもので、手前が西方向で日本海側、後ろが東方向で内陸側を示し、地震基盤から上層の地層（速度構造）の上面を色別に表示している。同図から敷地周辺の深部地盤には急峻な褶曲など、三次元的な不整形構造が見られる。さらに、地震基盤は約5～8kmと非常に深く、上部に堆積岩が厚く堆

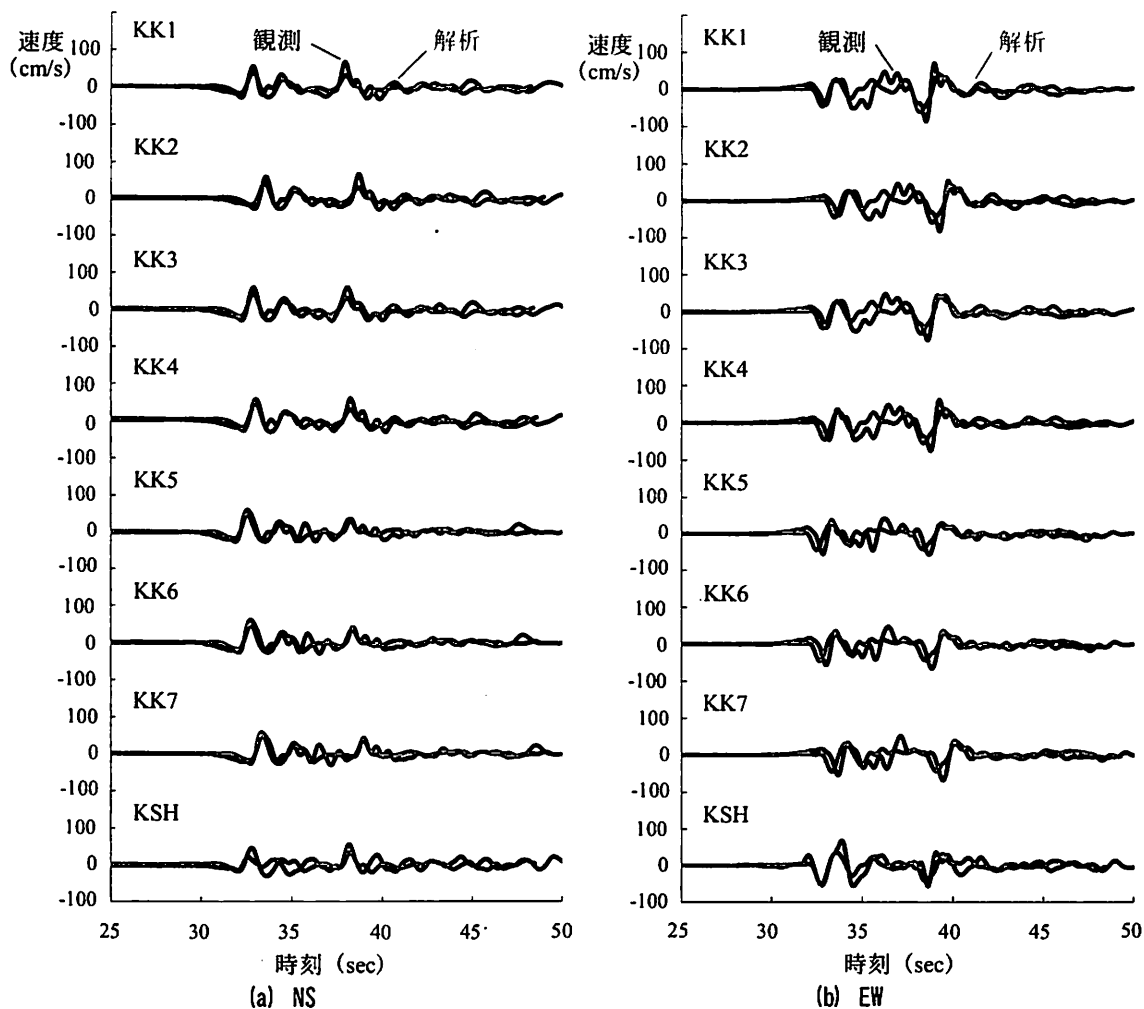


図-9 解析波形と観測波形の比較

積している。

4.2 深部地盤構造モデルによる地震動伝播解析

(1) 解析方法

3章で検討した震源断層モデルと、4.1節で作成した三次元深部地盤構造モデルを用いて、三次元差分法により地震動伝播解析を行い、発電所敷地の各号機とサービスホールの解放基盤表面の地震動を推定した。3次元差分法では、解析領域を敷地周辺30km × 35km × 13.4kmの範囲とし、解放基盤面 ($V_s=0.7\text{km/s}$) を地表面として、地盤構造モデルを $50\text{m} \times 50\text{m} \times 50\text{m}$ の格子点 (スタッガードグリッド) に分割した。解析領域の境界面には吸収境界を設定した。解析における有効周波数は約2Hz以下となっている。

震源モデルとして、アスベリティのみを考慮し、各アスベリティを4×4のダブルカップルの点震源でモデル化した。

(2) 解析結果

各号機とサービスホールの解放基盤表面の解析による速度波形と観測波形を図-9に合わせて示す。各号機の観測波形は原子炉建屋基礎版上の速度波形、サービスホールの観測記録は、はぎ取り解析で算定

した解放基盤面 (GL-250m) の速度波形とした。各号機の基礎版上の観測波形と解析結果の波形は、直接比較はできないが、両者の波形の形状は、パルス波の発生時刻や位相特性、振幅などが良く調和しており、解析により本地震による地震動の性状が概ね再現されている。

4.3 地震動伝播特性の分析

上記解析結果から、震源から敷地に伝播する地震波や波形に見られるパルス波の増幅特性を分析した。

(1) 地震波の増幅特性

第3アスベリティと敷地を通る東西断面を対象として、震源から解放基盤までの断面方向の地震動伝播状況を分析した。第3アスベリティ破壊後の7.92秒～13.84秒までの、5コマのスナップショットを図-10に示す。なお、スナップショットはNS方向とEW方向の速度波の合成波であり、青、緑、黄、朱色の順で速度が大きいことを示している。

7.92秒のコマでは、第3アスベリティが破壊すると共に、これより早く破壊した第1、2アスベリティの破壊による地震波が解放基盤に向い伝播している状況が示されている。9.36秒のコマでは、第3アスベリティの破壊で放射された地震波が集まり、地震

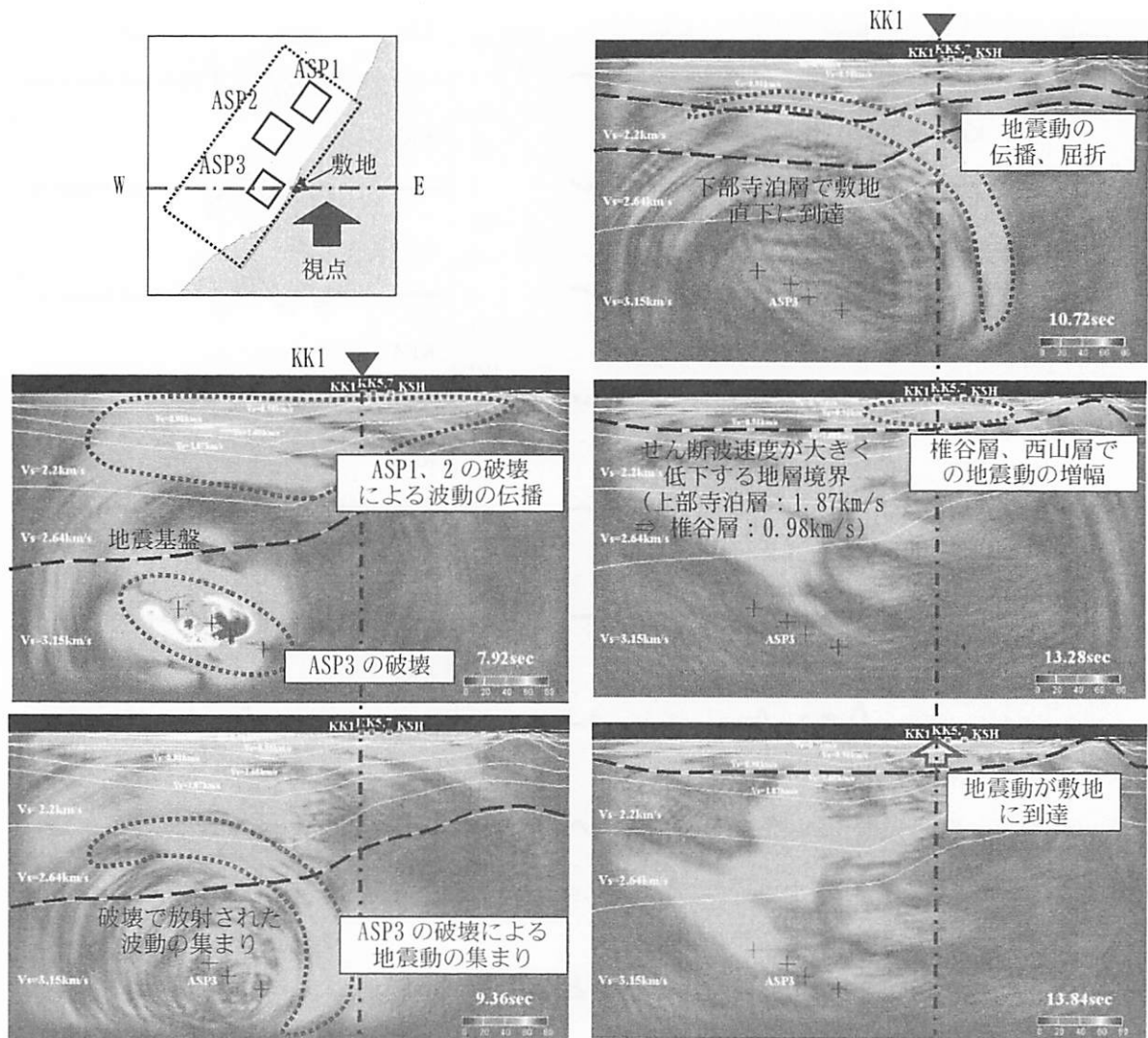


図-10 震源からの地震動伝播状況のスナップショット (NS と EW の合成速度波)

基盤の不整形構造の影響で敷地方向に屈折している。また、第1、2アスぺリティの破壊による地震動が、解放基盤付近に伝播している。10.72秒のコマでは、地震波が下部寺泊層で敷地直下に到達し、13.28秒では、せん断波速度が大きく低下する椎谷層、西山層内に伝播して大きく増幅している。また、解放基盤表面に到達した地震波は、インピーダンス比が大きな上部寺泊層で重複反射を繰り返し、椎谷層、西山層に滞留する傾向が見られる。

(2) 1号機での地震動の増幅特性

解析結果から、1号機直下の解放基盤に直達する地震波の伝播経路に沿って得られた地層毎の速度波形を図-11に示す。同図には1号機直下の地盤のせん断波速度の分布を併せて示している。速度波形の赤○印の波形は、第3アスぺリティの破壊で発生したパルス波を示す。同図から、地震波が、基盤岩からグリーンタフ+七谷層、下部寺泊層、上部寺泊層、椎谷層、西山層へと伝播する過程で、各層のせん断波速度の低下や不整形構造の影響により、パルス波が形成・成長しながら、敷地方向に屈折して伝播し

ている。地震波がせん断波速度が大きく低下する椎谷層、西山層に伝播すると、パルス波が大きく増幅して、敷地に伝播していることが分かる。

1号機の解放基盤に到達する地震波の各地層における最大速度分布を図-12に示す。最大速度は、第3アスぺリティによるパルス波の振幅に対応している。地震基盤から上部寺泊層までの最大速度は、15cm/s程度ではほぼ一定であるが、椎谷層と西山層で約60cm/sと4倍に増幅している。

(3) 1号機と5号機での地震動の増幅特性の違い

1号機、5号機、サービスホール直下の解放基盤面に直達する地震波の伝播経路に沿って得られた地層毎の速度波形とを図-13に示す。また、図-12には、1号機と併せて、5号機とサービスホールの地層毎の最大速度分布を示す。これらの結果から、地震波の伝播性状や第3アスぺリティによるパルス波の増幅の過程は、各波形でほぼ同様の傾向を示しているが、解放基盤表面における1号機のパルス波の振幅は、5号機とサービスホールの約1.5倍に増幅している。原因として、地盤の不整形性や速度構造の影響、第

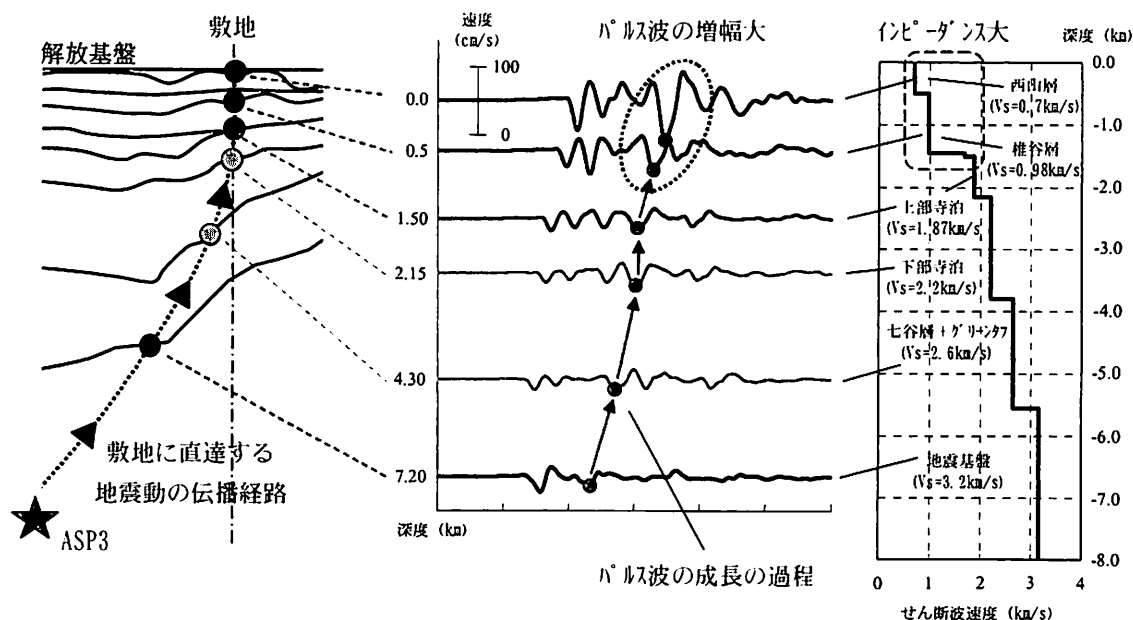


図-11 1号機での地震動（パルス波）の増幅特性（EW）

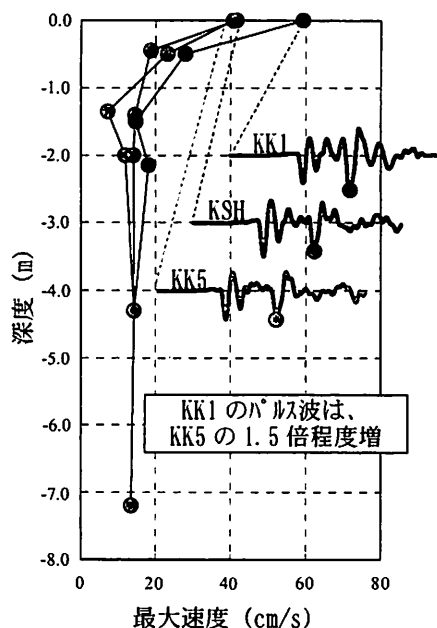


図-12 地層毎の最大速度分布（EW）

3アスペリティからの距離や方位などが考えられる。

上記のパルス波の増幅特性の違いの要因を検討するために、1号機直下の地盤構造を用いた水平成層地盤モデルにより地震動伝播解析を行い、三次元地盤構造モデルの結果と比較検討した。

震源および敷地周辺の解放基盤表面の最大速度について、三次元地盤構造モデルで解析した結果を成層地盤モデルの結果で除して、増幅比として表現したコンター図を図-14に示す。同図より、1号機周辺では、水平成層地盤に対する増幅比が約1.5倍となっている一方で、5号機とサービスホール周辺は増幅比は約1.0倍となっている。これらの比較から、1号機側で、深部地盤の三次元的な不整形構造の影響を受けていることが分かる。

5. まとめ

新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所での地震動増幅特性の検討結果から得られた知見を、以下に要約する。

5.1 震源特性の分析結果

- 震源断層モデルから推定される短周期レベルは、同規模の地震の平均的な値と比べ、1.5倍程度高かったものと考えられる。
- 本地震では、3つのアスペリティが破壊し、発電所敷地に強い地震動が発生した。特に、敷地に極近い第3アスペリティは、強い地震動を放射したのと考えられる。

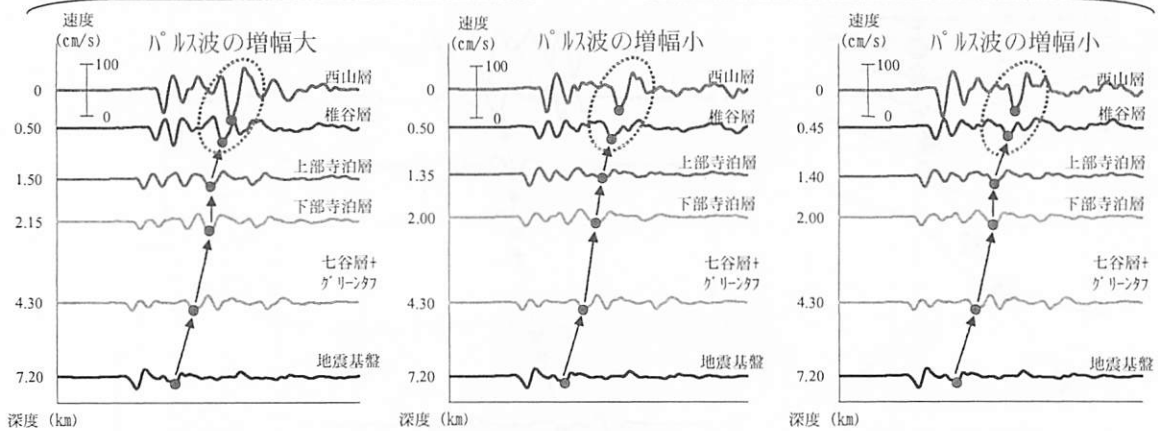
5.2 深部地盤の地震動伝播特性の分析結果

(1) 地震波の増幅特性について

- 震源から放射された地震波が、深部地盤の不整形性を伴う厚い堆積層を伝播する過程で、発電所敷地直下の地盤に集中し、解放基盤付近のせん断波速度が大きく低下する地層で増大したものと考えられる。
- 地震波の最大速度は、地震基盤から解放基盤で1号機側で約6倍、5号機側で約4倍に増幅した。

(2) 1号機側で地震動が大きく増幅した要因

- 1号機と5号機の解放基盤面の地震波の最大速度の差は、波形の後半に見られるパルス波の振幅の違いにより発生している。このパルス波は、第3アスペリティの破壊により発生した地震波が、不整形性を伴う厚い堆積層を伝播する過程で発生し、特に1号機側で大きく増幅した。
- 1号機側と5号機側のパルス波の増幅特性の違いについて、三次元地盤構造モデルと水平成層地盤モデルによる地震動伝播解析結果を比較して



(a) KK1 (b) KK5 (c) KSH
図-13 1号機、5号機、サービスホールでの地震動（パルス波）の増幅特性（EW）

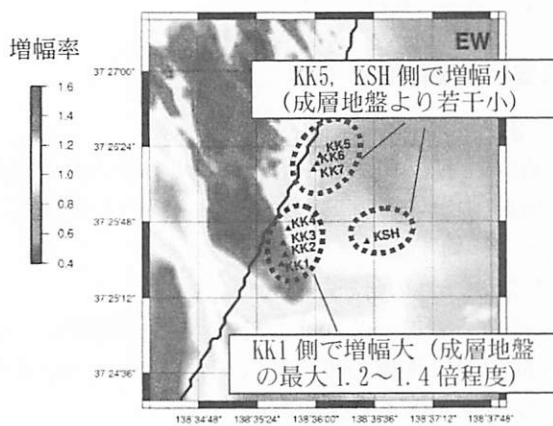


図-14 三次元深部地盤構造での最大速度と成層地盤での最大速度の比（EW）

分析した。その結果、1号機周辺では、三次元地盤構造モデルによる最大速度は水平成層地盤モデルの約1.5倍、5号機周辺では約1.0倍であった。特に、1号機周辺で、深部地盤の三次元不整形構造の影響により、地震波（パルス波）が大きく増幅したものと考えられる。

参考文献

- 1) 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，1981.7.20
- 2) 例えば 原子力安全基盤機構：2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析，合同W9-2-1，総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ 第9回，2008.5.22.
- 3) Japan Nuclear Energy Safety Organization : Evaluation on ground motion and equipment integrity of Kashiwazaki-Kariwa NPP against the Chuetsu-oki earthquake, International Workshop on Lessons Learned Form Strong Earthquakes Workshop, June 19, 2008.
- 4) 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に係る報告（第一報），2007.7.30.
- 5) 地震調査推進本部 地震調査委員会：平成19年新潟県中越沖地震の評価（主に断層面に関する評価），地震調査研究推進本部HP，2008.1.11.
- 6) 原子力安全基盤機構：地震に係る確率論的安全評価手法の整備＝深部地盤速度構造同定に基づく地震動特性評価に関する検討＝，JNES/SAE05-048，2005.12.
- 7) 入倉ほか：2007年新潟県中越沖地震の強震動と震源断層モデル -柏崎刈羽原子力発電所を襲った破壊の強震動-，入倉孝次郎地震動研究所HP，2007.9.4.
- 8) 釜江ほか：2007年新潟県中越沖地震（Mj6.8）の震源のモデル化と強震動シミュレーション，京都大学原子炉実験所 釜江研究室HP，2008.3.5.
- 9) 壇ほか：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，Vol.545，pp.51-62，2001.
- 10) 例えば 石油公団：昭和42年度 天然ガス基礎調査 基礎試推「下五十嵐」調査報告書，pp.20，1968.
- 11) 例えば 石油公団：昭和42年 天然ガス基礎調査 基礎物理探鉱「新潟平野」調査報告書，pp.14，1968.
- 12) 東京電力：柏崎刈羽原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書（6，7号機の増設）本文及び添付書類，1988.5（1990.1一部補正）
- 13) 東京電力：柏崎刈羽発電所 強震データ全地点記録等＜改訂版＞，財団法人震災予防協会，2007.