

平成 16 年新潟県中越地震の地震動と原子力発電所の建屋応答

植竹富一

東京電力株式会社技術開発研究所 uetake.tomiichi@tepcoco.jp

1. はじめに

平成 16 年 10 月 23 日午後 5 時 56 分頃新潟県中越地方で M6.8 の地震が発生し、新潟県川口町で震度 7、小千谷市、山古志村、小国町で震度 6 強を観測した。計測震度計での震度 7 は観測史上初である。この地震により、家屋の倒壊はもちろん、新幹線開業以来初の脱線事故、多くの斜面崩壊など多大な被害が発生した。消防庁のとりまとめ（平成 17 年 1 月 12 日現在）によると、死者 40 名、負傷者 4,574 名、全壊戸数 2867 戸となっている。

この地震では、K-NET、KiK-net をはじめ、気象庁や自治体の計測震度計により多くの強震記録が得られた。震度 7 を記録した川口町の計測震度計記録をはじめ、震源近傍で 1 G を超えた記録が数多く得られ、震源近傍の地震動特性の解明や、建物被害と地震動の研究に大きな貢献をされると考えられる。本報告では、平成 16 年新潟県中越地震によって得られた地震動の特徴を概観するとともに、剛な構造物の地震応答の一例として新潟県柏崎市・刈羽村に立地する東京電力柏崎刈羽原子力発電所の建屋の応答について紹介する。

2. 地震の概要と強震観測記録

平成 16 年新潟県中越地震は、新潟県中越地域の活褶曲地帯で発生した。褶曲軸は、北東—南東方向の走行を持ち、GPS 観測などからは、西北西—東南東方向の圧縮歪みが卓越することが知られている [例えば今給黎(2004)]。新潟県中越地震の震源メカニズムは、北東—南西走行で北西下がりの逆断層と推定されており、応力場と調和的であった [気象庁(2005)]。また、本震と同様な走行を持つ複数の断層系が活動した [例えば平田(2004)]。ため、規模の大きな余震が数多く発生している (平成 16 年 12 月 31 日現在 : M5.8 以上の余震が 6 つ発生)。

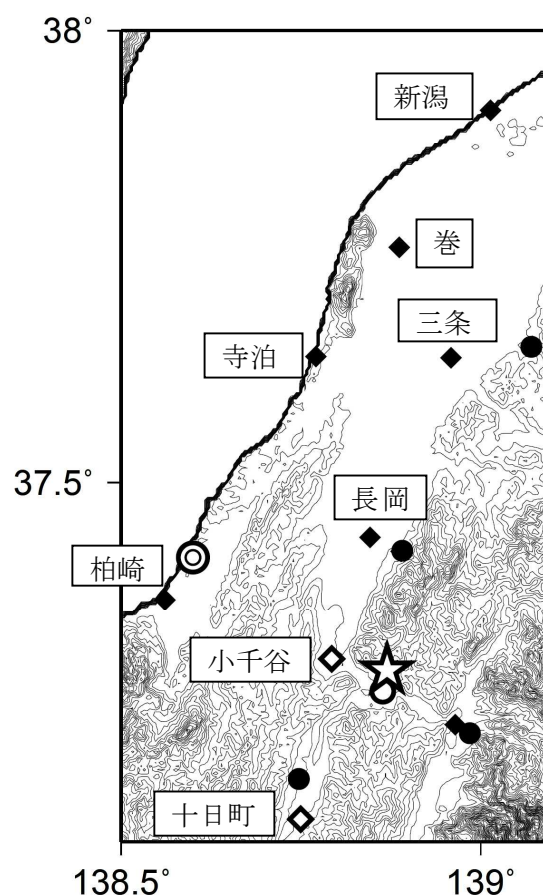


図 1 中越地震の震央 (☆) と周辺の観測点 (● : KiK-net, ◆ : K-NET, ◇ : 1 G を超えた K-NET 観測点, ○ : 川口の震度計観測点, ◎ : 柏崎刈羽発電所)

この地震では、K-NET、KiK-net、気象庁及び自治体の計測震度計などで数多くの強震記録が得られている。図 1 に震央と防災科研による観測点、柏崎刈羽発電所の位置、川口町の震度計の位置を示す。この地震では、断層近傍、特に上盤側の観測点で、既往の距離減衰式を大きく上回る地震動が記録された [例えば青井・他(2004)]。K-NET の小千谷・十日町と川口町の加速度波形を図 2 に擬似速度応答スペクトルを図 3 に示す。

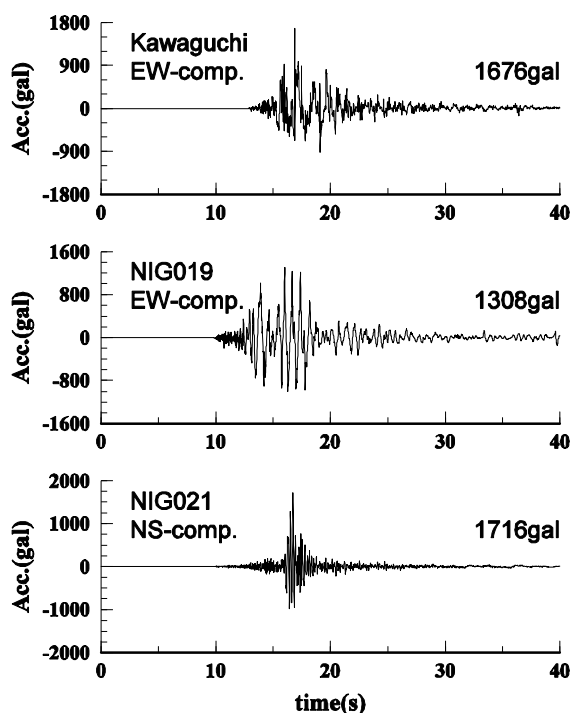


図2 新潟県中越地震で1000galを超えた加速度波形の例：上から川口町の計測震度計記録(EW成分)，K-NET小千谷(NIG019：EW成分)，K-NET十日町(NIG021：NS成分)

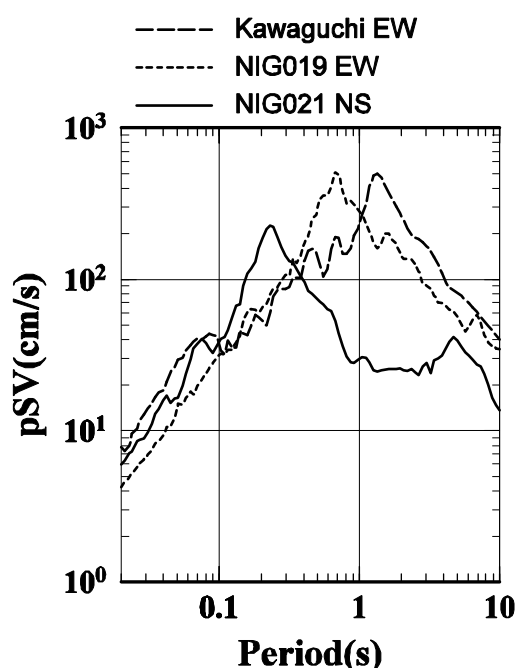


図3 1Gを超えた波形の擬似速度応答スペクトル（減衰5%）：川口(EW成分)，K-NET小千谷(NIG019：EW成分)，K-NET十日町(NIG021：NS成分)

大加速度を記録したこの3地点の波形は、それぞれ異なっている。川口や小千谷では主要動の周期がやや長い点は似ているが、小千谷ではS波の後に一定周期の後揺れがあり最大値はそこで発生している。また、十日町の波形は全体的に短周期である。擬似速度応答のピーク周期もそれぞれ異なっており、十日町で0.25秒付近、小千谷で0.7秒、川口では1.2秒付近である。このように、それぞれに特徴が異なることは、大加速度の発生要因が単一でないことを示していると考えられる。青井・他(2004)は、震源近傍の大加速度の要因として上盤側で震源からの距離が近かったこと、褶曲の発達する地質構造、表層地盤による増幅、地盤の非線形化の影響などを挙げた上で、小千谷のK-NET記録(震度7相当)と約700m離れた気象庁の震度計記録(震度6強)を比較し、表層地盤による影響が大きいとしている。今後、地盤調査や余震観測〔例えば山中・他(2004)〕の解析などが進んだ段階で明らかになる要因が多いと考えられる。

大加速度を記録したK-NETの小千谷・十日町では加速度の割に建物被害が少なかったのではないかと指摘もある。今回の大加速度と構造物被害に関して、境・他(2004)は、1995年兵庫県南部地震の神戸での記録との比較から、構造物に影響が大きい帯域より短周期側が卓越していたとしているが、今後さらに検討すべき課題であろう。なお、小千谷市に免震構造物があり、そこで強震観測記録が得られている[溜・鴫田(2004)]。建物基礎上では800galを超えるように記録であるが、免震層状では200gal程度となっており、免震の効果を示す一例であろう。

青井・他(2004)は、やや長周期帯域の速度応答スペクトル値から、新潟平野や関東平野など堆積層の厚い平野でやや長周期地震動が増幅されたことを指摘している。図4に震央付近から新潟(NIG010)にいたるK-NET観測点の速度波形の変化を示す。加速度波形を積分した波形である。震央に近い長岡(NIG017)では長周期の後続波は見られるものの継続時間は短い。北上するに従って後続波が励起され、長周期の後続波が長く続く

ようになる。新潟平野の外にある寺泊(NIG016)では後続波の発達が新潟平野内に比べて小さいことがわかる。新潟地域の地下構造と表面波の関係については、植竹(1995)や植竹・他(1997)の解析事例があるが、充実した観測網によってM6.8 という比較的大きな地震が観測されたのは、今回が初めてである。今後の解析により、新潟地域の地下構造と地震動の関係の解明も一段と進むと考えられる。

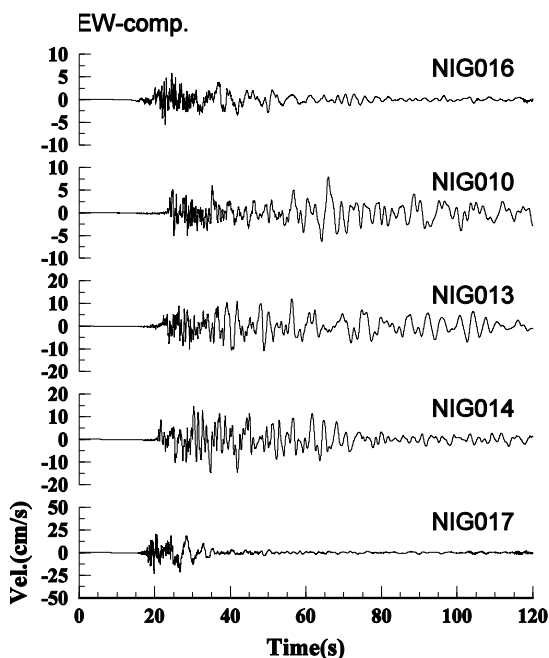


図4 新潟平野での速度波形の変化(EW成分): 上から寺泊(NIG016), 新潟(NIG010), 巻(NIG013), 三条(NIG014), 長岡(NIG017)の速度波形

3. 原子力発電所建屋の地震応答

柏崎刈羽原子力発電所は、柏崎市と刈羽村にまたがる砂丘地域に立地している。「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」[原子力安全委員会(1981)]により、建物・構築物は原則として剛構造、重要な建物・構築物は岩盤に支持とされていることから、原子炉建屋は表層の砂層を除去し、新第三紀の泥岩層上に建設されている。図5に5号機原子炉建屋の断面図を示しているが、高さ約80mのうち、約半分が地下部分となっている。地震計は、固有周期0.2秒の速度帰還型加速度計であり、最大計測範囲1000gal、周波数範囲

0.05~15Hz、サンプリング周波数100Hz、A/D:16bitとなっている。この加速度計は、原子炉の運転制御用の地震計(地震スクラム検出器)とは、別系統の地震計である。

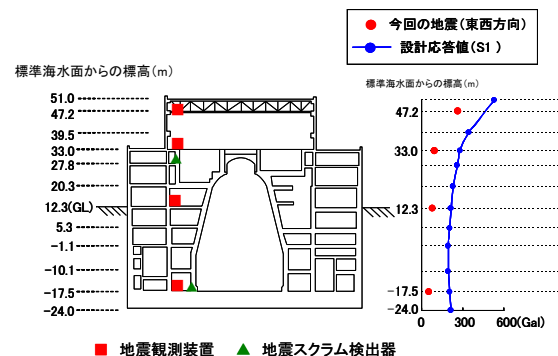


図5 5号機建屋内観測点配置及び今回の観測値と設計応答値の比較

平成16年新潟県中越地震の震央から発電所までの距離は約28kmである。本震で観測された最大加速度値を設計上の値と比較して図5に示す。各階の最大加速度の分布形状は、設計応答値の分布と調和的である。原子炉建屋基礎版上で今回記録した値は、水平54gal・上下57galであり、原子炉の自動停止設定値: 水平120gal・上下100galに対して十分余裕があった。この地震では運転継続の支障となる被害はなく、地震動も原子炉の自動停止レベルに達しなかったため、発電所は運転を継続した。

建屋内の4地点、地盤の地表(G51:平均海水面から12m)及び地中(G54:GL-192m)の観測波形を図6に示す。発電用原子炉施設では、せん断波速度が700m/sとなる基盤で設計用地震動を規定する。ボーリング調査によればG54設置位置では、せん断波速度840m/sとなっている。上4つが建屋系、下二つが地盤系(地表及び地中)の観測記録である。地中(G54)に比べ地表記録(G51)は数倍の増幅を示し、特に主要動部分の増幅が大きい。また建屋内でも増幅が見られ、最上部R51観測点で大きくなっている。ただし、建屋内の記録は最上層を除き、地表よりも小さい最大値を示している。また、UD成分は建屋内での増幅が小さいことがわかる。後続の位相はどの観測点でもそろっており、地盤建屋が一体で動いていることが示唆される。

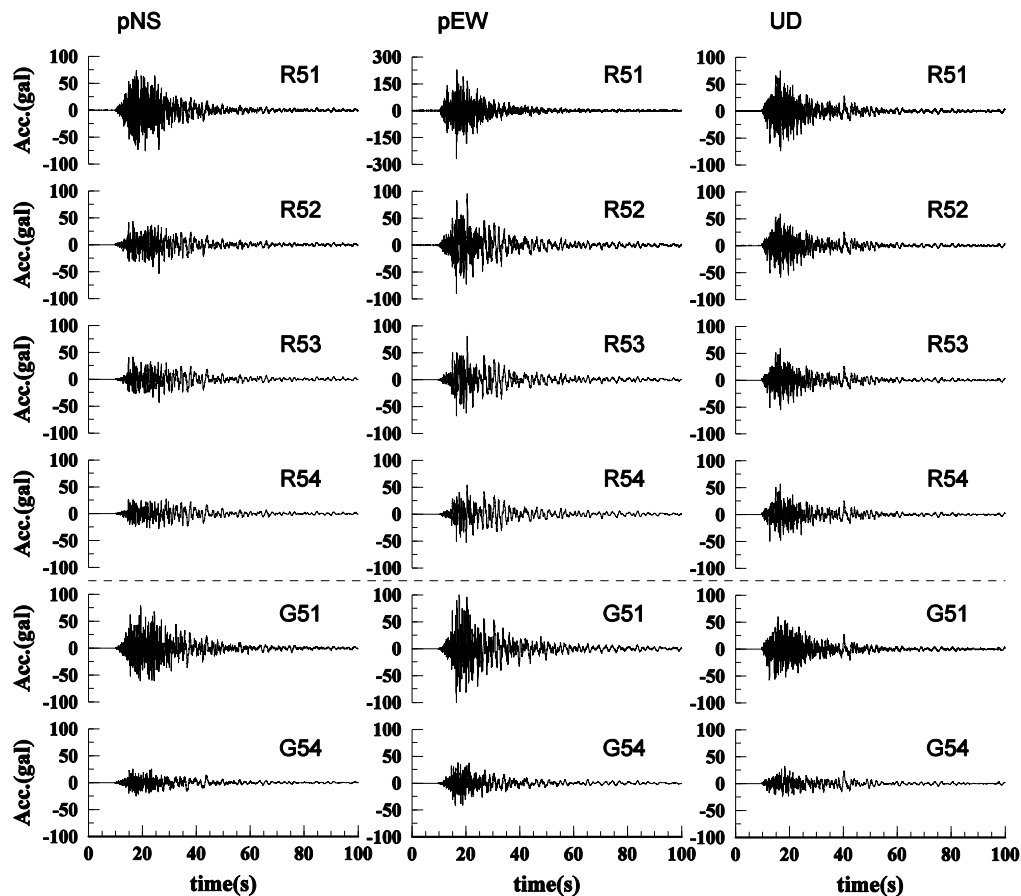


図6 柏崎刈羽発電所5号機における観測波形

R51：建屋内（トラス端部），R52：建屋内（オペフロ），R53：建屋内（GL レベル），
R54：建屋基礎上，G51：地表（GL-2.7m），G54：GL-192m

まず，地表（G51：GL-2.7m）と G54，R54
の記録のフーリエスペクトル比を図7に示す。
表層地盤の周期や建屋系の応答に比べ波長が
十分に長くなる低周波数側では比は1に近づ
くが，高周波数側では表層の増幅の影響で比
が小さくなる．地中地震計の記録は0.2Hz 付
近から地表に比べて小さく，1/5～1/10 とな

る帯域もある．建屋基礎上の記録は1Hz より
高周波数側で地表地震計の応答より小さくな
り，水平動で4Hz、上下動で10Hz 付近にく
ぼみがある．これは，剛な構造物が地盤中に
埋め込まれていることによる効果であると考えられる．一方，GL-192m とのスペクトル
比にも同様な傾向が見られるが，これは地表

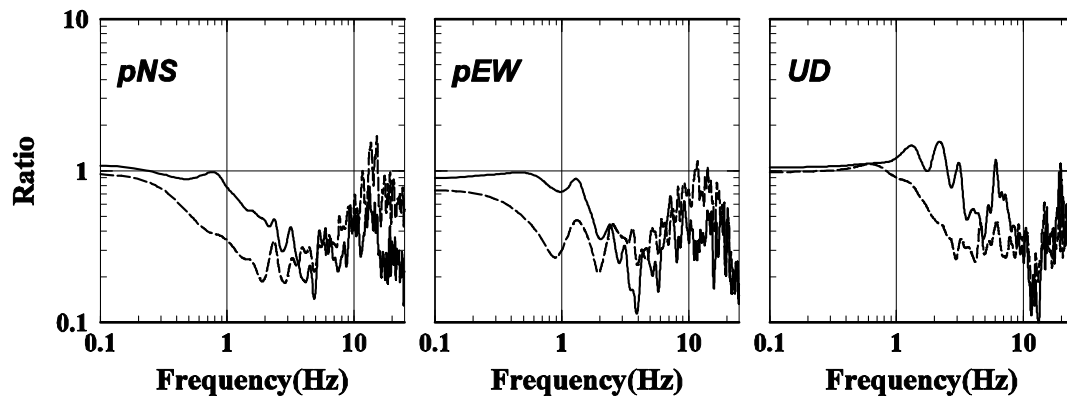


図7 地表記録を基準としたフーリエスペクトル比
点線：G54/G51，実線：R54/G51

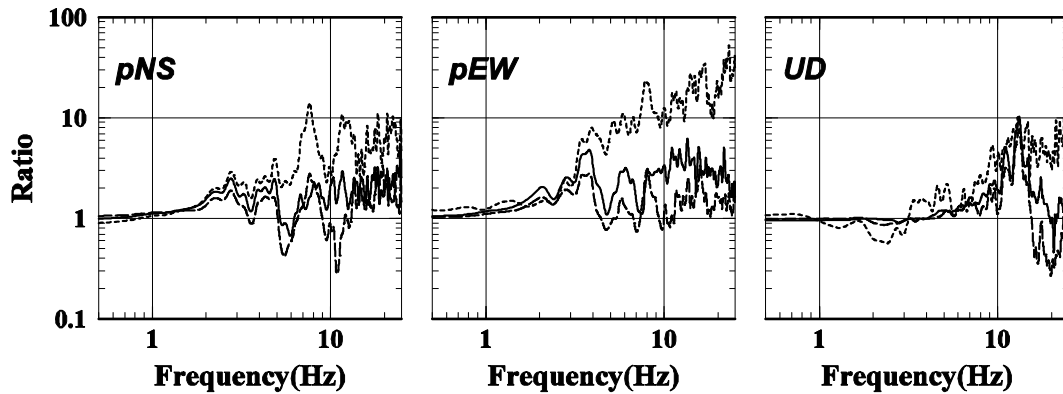


図8 基礎盤を基準とした原子炉建屋内フーリエスペクトル比
一点鎖線：R53/R54，実線：R52/R54，点線：R51/R54

記録に含まれている表層地盤の増幅分を反映したものと考えられる。

次に原子炉建屋内の地震動の増幅を見るために基礎版上の記録を基準としたフーリエスペクトル比を図8に示す。水平成分は、基礎版上の記録に対して2 Hz 付近まではほとんど増幅が見られない。p EW 成分の3.5Hz 付近に共通のピークが見られるが、これが基礎固定の時の建屋系の1次固有振動数と考えられる。また、UD 成分では10Hz 付近まで増幅が見られず、水平動に比べて高い固有振動数となっている。なお、建屋上部のトラス端部につけられた地震計が、最も大きい増幅を示している。最上階は、原子炉の点検や燃料取り替え等の都合から大空間が確保されており、それ以下の階に比べ振動しやすい傾向がある。特に、壁の面外方向に当たる pEW 方向の振動が大きくなっている。

4. K-NET 柏崎と柏崎刈羽発電所の比較

柏崎刈羽発電所5号機の地表（G51）とK-NET 柏崎地点（NIG018）の加速度記録を比較して図9に示す。両者の震央からの距離はほとんど変わらず、両地点の距離は10km 以下で、震央から見た方角もほとんど同じである。波形の最大振幅はほぼ同じであるが、K-NET 柏崎には顕著な長周期の後続波が見られる。K-NET 柏崎が、平野の真ん中にあるため平野内で成長した堆積層表面波を見ている可能性がある。こういった表面波の挙動を把握するためにはさらに高密度の地震観測や、地下構造の情報収

集が望まれる。

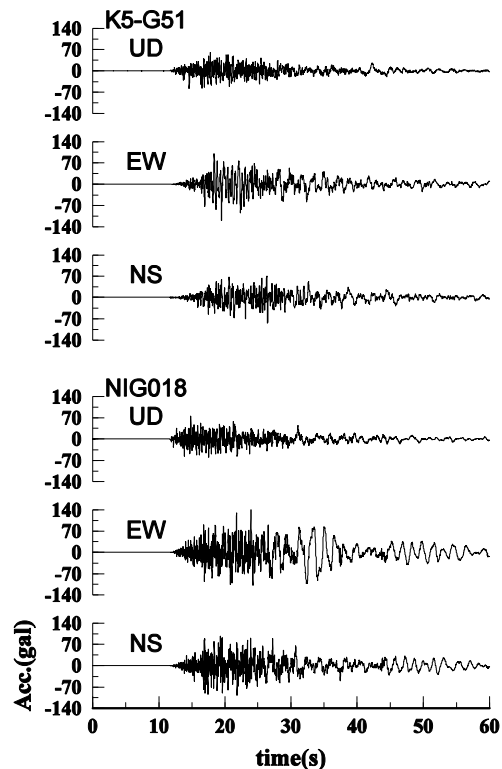


図9 K-NET 柏崎と柏崎刈羽5号機地表地点の波形比較

5. おわりに

新潟県中越地震による地震動の概要と柏崎刈羽原子力発電所での観測記録について報告した。今回の地震では、震源域近傍で大加速度の強震記録が数多く得られている。こういった記録は、震源近傍地震動の評価とともに構造物と地震被害の関係解明に活用されていくと考えられる。また、発電所の記録に関し

ては、地震時の剛構造物挙動の貴重な観測事例として解析が進められる予定である。今後の研究の進展が期待される。

謝 辞

K-NET, KiK-net の記録は防災科学技術研究所のホームページから、また、川口町の計測震度計記録は気象庁のホームページからインターネットを通じて入手しました。貴重な記録を公開された防災科学技術研究所、気象庁、新潟県の自治体の方々に感謝致します。

また、本報告作成にあたり、東電設計：真下貢氏、東京電力原子力技術・品質安全部：敦賀隆史氏、東京電力技術開発研究所：土方勝一郎氏から、ご意見を頂きました。記して感謝いたします。

文 献

青井真・森川信之・本多亮・関口春子・功刀卓・藤原広行，2004，なぜ新潟県中越地震の地震動は大きかったのか？，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，19-26.

原子力安全委員会，1981，発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針。

平田 直，2004，2004 年新潟県中越地震の本震と余震，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，11-17.

今給黎哲郎，2004，地殻変動観測から見た新潟県中越地震と周辺のテクトニクス，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，1-5.

気象庁，2005，地震概況 2004 年 10 月～2004 年 11 月，日本地震学会ニュースレター，Vol.16, No.5, 75-86.

境 有紀・小杉慎司・大月俊典・中村友紀子，2004，強震動と建物被害，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤

工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，27-34.

消防庁，2005，平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震（第 64 報）。

溜 正俊・鵜田 隆，2004，免震建物の地震観測記録と振動解析結果，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，111-116.

植竹富一，1995，新潟県南部の浅発地震により励起された表面波について，地震 2, 48, 99-107.

植竹富一・山中浩明・菅原正晴，1997，やや長周期表面波の群速度の逆解析による地下構造の推定と地震動評価への応用，日本建築学会構造系論文集，第 496 号，37-43.

山中浩明・元木健太郎・福本俊一・高橋寿幸，2004，2004 年新潟県中越地震の余震及び微動の観測，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会・土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会・震災予防協会，35-38.