

地盤環境の影響を考慮した現代社会の地震災害危険度

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 環境・安全マネジメント講座
 福和研究室 博士課程前期課程2年 岩田朋大

1. 序論

日本の都市は、戦後から高度成長期を経て、著しく拡大しており、それに伴って地盤条件の悪い場所の利用も増加している。さらに埋立てや造成などにより、地盤状況の悪い土地を生み出してきている。

地震被害と、地盤構造や地形状況などの地盤環境とは密接に関わっている。同じ地震規模でも、軟弱な地盤や局所的な地形効果の影響で、地震時の揺れが大きく増幅されることが知られている。しかし、現行の耐震基準ではこれらの影響を十分に考慮していない。従って、法令を満足した建物でも、地盤条件の相違により建物被害に差異が生じる可能性がある。地盤条件の悪い敷地・地域の開発により、大きな地震入力を受ける建築・土木構造物は増加しているはずである。

一方で、地震によって損なわれる社会の利便性は60年前とは比べ物にならない。中高層の共同住宅は増加しており、ライフラインやエレベータの停止などが起こると生活の基盤を失う。高層階に居住する身体的に不自由な住民にとっては、高層難民の問題は大きい。ライフラインに依存しきった生活を送る現代人にとってそれらの維持は非常に重要な問題である。ところが近年、重要な社会基盤を地盤環境の良くない場所に集中して造ってきた。例えば、重要な電力供給施設である火力発電所や石油タンクなどは海岸沿いの軟弱地盤に集中しており、地震被害によるエネルギー危機の発生が懸念される。

以上のように、地盤環境およびその変化が私たちの生活における自然災害の影響度合いに大きく関わってきたと考えられる。本論では、図1に示すように、地盤環境を軸に、現代社会の災害危険度を把握することで、将来の災害像を予測し、被害を最小限にする(減災)ための知見を得ることを目的とする。

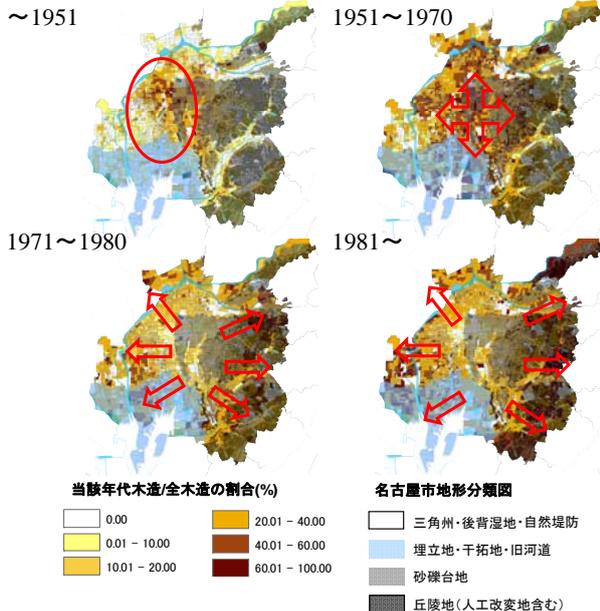


図2 名古屋市の住宅拡大の様子

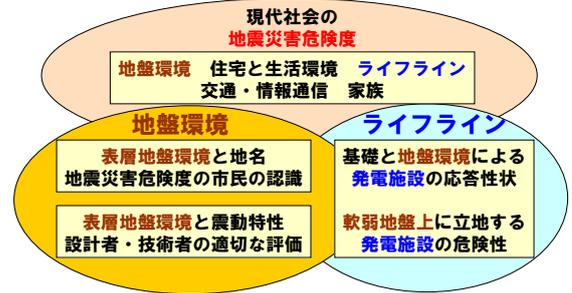


図1 本研究の構成

2. 統計に基づく過去から現代への災害危険度の変遷

過去と現代の社会環境の変化に関して、統計資料などを基に、まちの地盤環境、住宅と生活環境、ライフライン・交通・情報通信、家族などの項目について、災害危険度という点から分析を行った。ここではその一部を示す。図2に名古屋市の現存する全木造建物に対する、年代別の木造建物の割合と地形分類図を重ね描いたものを示す。過去に比べ現在は、沖積低地や埋立地などの地盤の軟弱な地域に居住地域が広がっている。また、丘陵地の宅地造成地などの揺れの増幅が予測される地域にも近年広がりを見せている。結果として強い揺れとなる地域の人口は、総数・比率のいずれも著しく増加している。図3に全国の共同住宅の階数の変遷を示す(以下はすべて全国値)。中高層や超高層の共同住宅が増加している。高層階は地面に比べ強く揺れ、高層難民や同時被災者の増加などが懸念される。近年、高齢者世帯は増加傾向にあり(図4)、また居住地も市街地中心部の古い木造住宅(図2)に多いため、兵庫県南部地震のような木造密集地帯での被害も懸念される。図5に電気の普及状況の変遷を示す。昭和20年代は、照明に電力を利用する程度であったが、現在ではあらゆる設備がライフラインに依存している。そのため、これらがもし途絶すれば、生活の維持に多大な障害をもたらす。また、電気やガスの供給路の途絶のみでなく、大本の発電所などが被災すれば広範な地域に甚大な影響をもたらす。図6に、中部地域における電力施設の立地状況を示す。火力発電所などの大規模な施設は海岸に集中しており、軟弱な地盤であるだけでなく、東海・東南海地震の震源域の間近であるため、非常に大きな揺れが予測されている。このような災害に備える地域の体制は十分ではなく、例えば消防団数は年々減少傾向にあり(図7)、地域内での共助に関して、高齢者などの災害時要援護者の増加に対して心許ない。

地盤環境や社会・生活環境からみて、現代社会は過去に比べて災害に対して脆弱なことが明らかとなった。

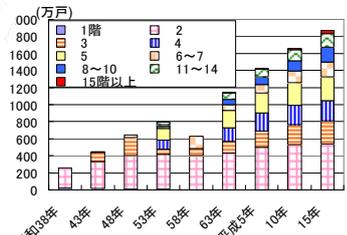


図3 共同住宅階数別総数の変遷

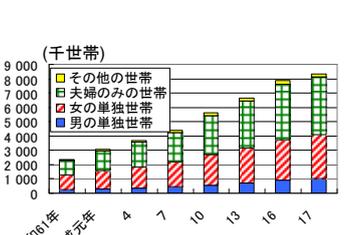


図4 高齢者世帯の変遷

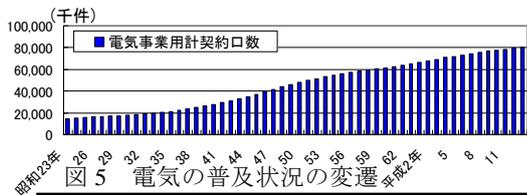


図5 電気の普及状況の変遷

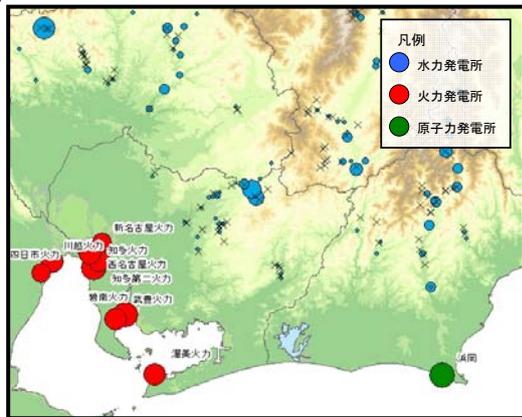


図6 中部地域電力施設の立地

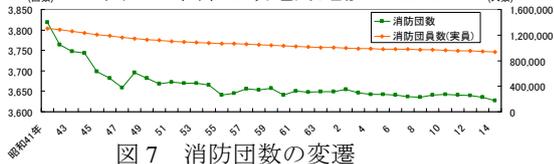


図7 消防団数の変遷

3. 表層地盤状況と地名

地名は、ある場所の呼称が多くの人々に共通認識され定着したものであり、その土地の特徴的な地形(=微地形)を表すことが多い。微地形は、ごく表層の地盤状況と関連しており、地名から地盤特性を推測することが可能と考えられる。また、地名には、過去の地形の情報も含まれており、過去から現在までの地形の変化の情報も有している。従って、地名を分析することで、過去の災害の教訓や自然災害に対して弱い土地などを知ることができると考えられる。地名は、地盤条件など専門的なものよりも一般の人々に身近で、興味、関心が高い。地名と地震ハザードを結びつけることで、一般市民に対する地震災害危険度の説明力を向上させることが可能である。

地名分類は、文献等を元に独自にまとめ、適切かどうか、地図上にプロットして試行錯誤を経て再整理した。その結果を表1の漢字分類にまとめている。利用する地名は、改名状況や分布密度から判断して、バス停名称を用いた。

名古屋市について、分類された地名と地形との対応を、地形分類図と比較検討した結果を図8に示す。良好地盤を示す地名に関しては、42.6% (126/296) が洪積台地や丘陵地などの良い地盤に適合した。軟弱地盤を示す地名に関しては、59.0% (425/720) が低地・水辺・盛土に適合した。

地名と地盤特性の相関を、AVS30(表層30mの平均Vs値)及び震度増分を用いて検討する(図9)。バス停を含むメッシュのAVS30・震度増分を抽出し図10に示す。グラフ中の数値は地名の件数である。低地の地名に対応するメッシュのAVS30が高い値を示したため、さらに詳細に地名を分析したものを図11(AVS30散布図)に示した。図12より低地を示す分類のうち、谷地の地名が固い地盤

に分布していることが分かる。また、谷地を除けば地名の分類とAVS30・震度増分の結果はばらつきが大きいのが概ね対応している。

以上より、地名には微地形の情報、さらにそれに伴う地盤震動の特徴などの情報が含まれていることが明らかになった。また、過去から現在への地盤環境(微地形)の形成や、地震災害の教訓なども含まれている。地名を用いて一般の人々の地震災害についての認識を深めることができると考えられる。

表1 地名漢字分類一覧

やま	山、尾、岳、嶺、峰、嶺、嶺
台地	岡、丘、台、坂上、坂上
高上	高上
自然堤防等	崎、崎、崎、崎、崎、崎、崎
傾斜	坂、段、乗越
雑字	森、林
河川	川、河、江、瀬
たまる	池、湖、沼、沢、淵
湧く	泉、井
なみ	波、浪、瀬、汐
浜辺・干潟	浜、洲、州、須、須、須、須、須
うみ	海、港
水際	浜、縁、渡、島、岸、砂
入江	磯、浦、浦、入、状
人工物	堤、橋、船、舟、津、港、湊
水の状態	水、流、流、流、流、流
植物	草、葎、蘆、芦、菅、蒲、菰、藪、蓮、藻、竹
水鳥	鴨、鶴、鵜
生物	貝、魚
窪地	窪、凹、久保、坂下
谷地	谷、沢、淵、池、溪
低湿地	洲、久手、泥
低下	低、下
農田地	田、野、原、代
耕開墾	新開、墾、針、張、播、治、春
農作物	稲

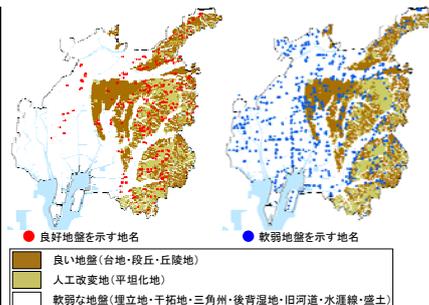


図8 (左)良好地盤地名 (右)軟弱地盤地名

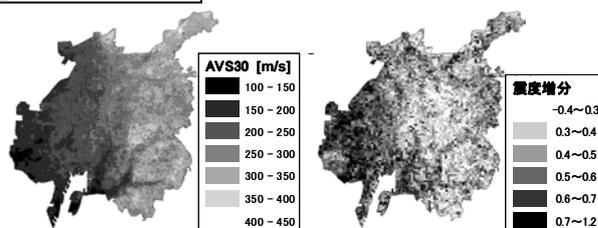


図9 名古屋市のAVS30(左)と震度増分(右)

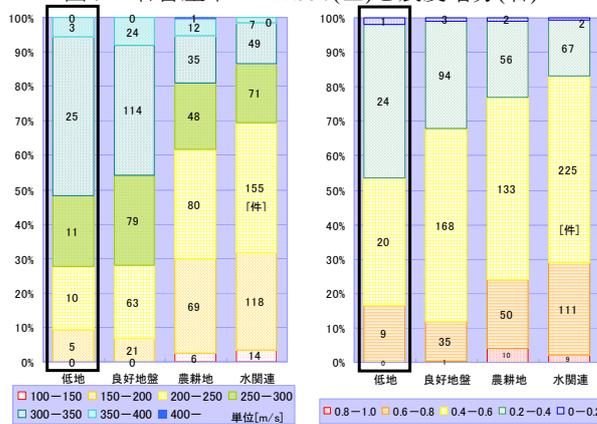


図10 地名と地盤特性(AVS30、震度増分)

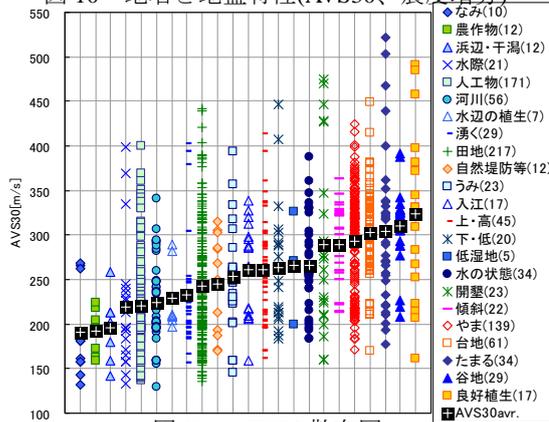


図11 AVS30 散布図

4. 表層地盤環境と地盤震動特性

地震災害における危険度を考える際に、地盤の揺れを正確に予測することは非常に重要であり、構造技術者が耐震設計をする際には、正確な地盤調査と地盤構造の適切な評価が必要となる。現状では表層地盤構造を単純な2層モデル等に置き換えて地盤特性の評価を行っているが、現実には地盤のせん断波速度は地質の変化や拘束圧効果により漸増していると考えられる。そこで地盤構造を簡易なモデルに置換した場合と、実状を考慮したモデルにした場合では地盤震動特性にどのような影響があるのかを考察する。図12に解析モデルと伝達関数を示す。S波速度漸増モデルの方が、単純2層モデルよりも振幅倍率は大きくなっていることが分かる。これは、層厚で重み付けした平均S波速度が同じでも、実状の地盤に則したモデルの方が、単純なモデルよりも振幅が大きくなることを示唆している。

即ち、限界耐力計算法や、設計用入力地震動作成などにおける表層地盤の単純化は揺れの大きさを危険側に評価している可能性があることを示している。

5. 電力発電施設の耐震性

現代社会において、ライフライン、特に電力に対する依存が大きいことは先述の通りである。電力網のみでなく、発電施設自体の耐震安全性の確保も重要である。こ

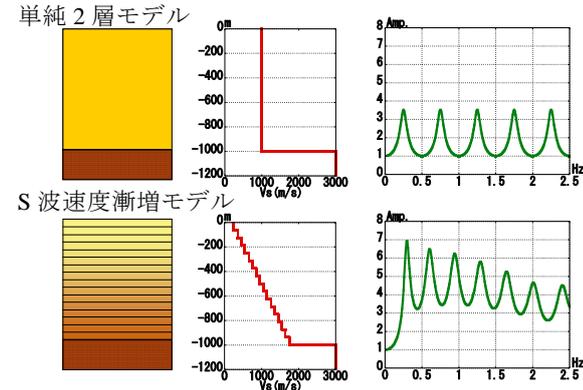


図12 各モデルと伝達関数(2E/2E)

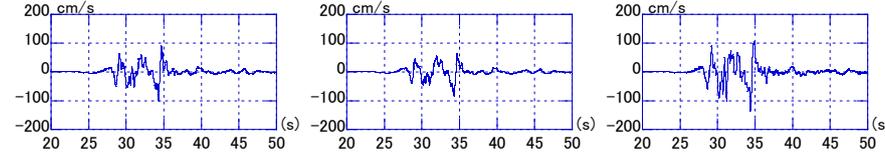


図14 オペレーティングフロア(左)、4号機基礎盤上(中)、地盤(右)の速度波形

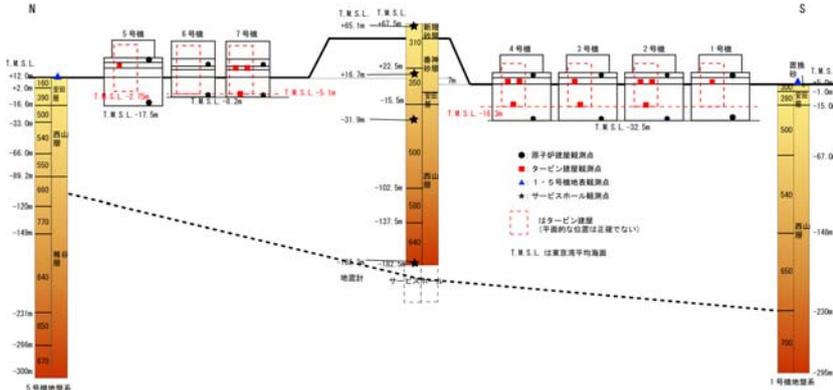


図13 発電所敷地地震計配置図

こでは、原子力発電所及び軟弱地盤上に立地する火力発電所について、地盤環境や基礎形状が応答に与える影響を、観測記録と数値解析から検討する。

2007年新潟県中越沖地震では、震源近傍に位置する柏崎刈羽原子力発電所において大きな加速度の強震動が多点で観測された。図13に、発電所敷地地震計配置図を示す。図14、図15に1号機地盤観測小屋及び4号機基礎盤上、オペレーティングフロア(以下オペフロ)の観測速度波形、各地点間の伝達関数を示す。地盤の記録は、最大値が大きく、短周期成分が多く含まれている。これに対し、建物内の記録は地盤と建物の動的相互作用による入力損失効果で、短周期の地震動が減少している。

基礎形状や地盤物性が違った場合の、動的相互作用効果が原子炉建屋に及ぼす影響を解析的に検討する。解析結果と観測記録を比較すると、良く対応しており(図16)、この解析モデルを基に検討を行う。まず、基礎形状の違いによる入力の差を、根入れの有無による比較から考察する。図17に、モデル概要、伝達関数、基礎盤上の応答を示す。根入れを有するモデルの入力損失が大きく、その影響は応答波形にも現れている。次に、地盤物性の違いによるインピーダンス、応答の差を図18に示す。地盤が固い方が逸散減衰効果が小さく、オペフロの応答が非常に大きくなっている。建屋の減衰3%から考えるとほぼ基礎固定と同程度の増幅である。加速度波形についても、地盤が固いほど、オペフロの振幅の増大や短周期化が目立つ結果となった。

愛知県南部の軟弱地盤上に立地する火力発電所のタービン建屋について、多数の杭基礎を考慮した相互作用モデルにより応答解析を行った結果を図19に示す。入力は、想定東海・東南海地震(連動)であり、各建屋の伝達関数(基礎/地盤)及び基礎応答を示す。新潟県中越沖地震における原子炉建屋の応答(図20)に比べ、最大速度が非常に大きく継続時間も長い。震源近くの軟弱地盤上に重要電力施設を建設することの危険性は明らかである。

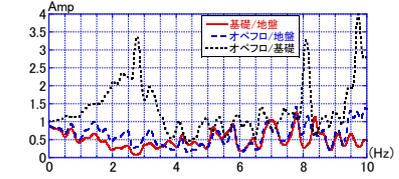


図15 伝達関数

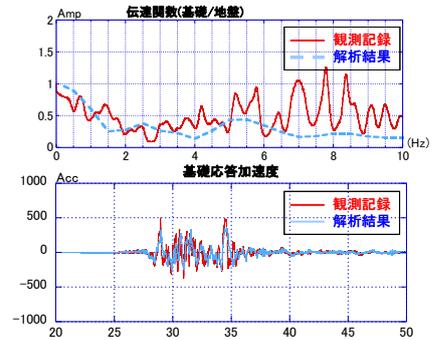


図16 解析と観測の比較

(上：伝達関数(基礎/地盤)、
下：基礎応答加速度)

以上から、柏崎刈羽原子力発電所の建屋は、深い根入れを有する基礎形状であったことや、軟岩（西山層 $V_s450\text{m/s}$ ）に岩着していたことが、揺れの低減に繋がったことが明らかになった。硬質岩盤に立地する原子力発電所の場合は根入れなしで建てられており、この場合には建屋への入力が大きくなる。今後、他の原子炉建屋の近傍で同規模の地震が起こっても、柏崎刈羽原子力発電所と同程度の揺れで済むとは限らないと考えられる。また、火力発電所の検討から、将来の大地震発生時においてライフラインの大本施設である発電所が被災することの危険性を明らかにした。

6. 結論

本論では、地盤環境が現代社会の地震災害危険度に及ぼす影響について、いくつかの視点から検討した。

- 1) 過去から現代への社会の変遷を見ると、沖積低地や海岸部にまちを広げ、さらに丘陵地などにおいては宅地造成のために切土盛土を行ってきた。すなわち、町を危険な場所に広げてきた。また、住宅の高層化、高齢化、公助力の低下など、自然災害に対して社会は非常に脆くなっている。
- 2) 表層地盤環境、特に地形状況と地名には深い関わりがあり、地名からは、地形の変遷や過去の災害の教訓を知

ることができる。地名と地震ハザードの関係を用いて一般の人々に伝えることで、地震被害予測を身近に感じてもらうことができ、防災活動や耐震化の啓発に有効である。

- 3) 表層地盤環境と地盤震動特性には密接な関係がある。耐震設計における地盤環境の評価には検討の余地があり、モデル化などで危険側の評価になる可能性がある。設計者、技術者はそのことを知っておかなければいけない。
- 4) 現代社会が過度に依存しているライフライン(電気)の重要施設である発電所について、解析的な検討によって、基礎形状や地盤構造によって応答が大きく異なることを示した。また、この地域における想定東海地震・東南海地震(連動型)の発生を仮定した際の発電所の応答について検討し、軟弱地盤上のライフライン施設が被災する際の危険性について指摘した。

現代社会の方が昔よりも災害に強いという誤解がある。しかし、居住地域は地盤環境の悪い(地震の揺れの大きい)場所へ広がり、便利ではあるが脆い社会となった。現代社会の地震災害危険度、それにおける地盤環境の重要性について、研究者や技術者が意識して正しく評価し、市民一人ひとりが理解して減災行動の必要性を認識しなければならない。

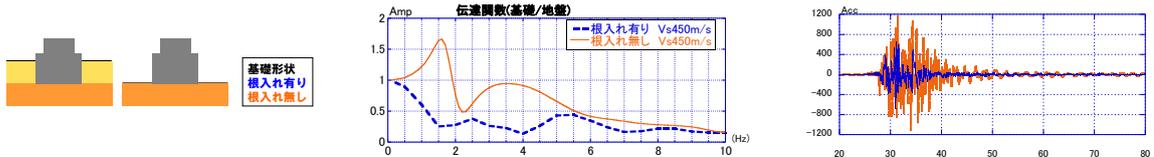


図 17 根入れの有無による差(左：モデル、中：伝達関数、右：応答加速度波形)

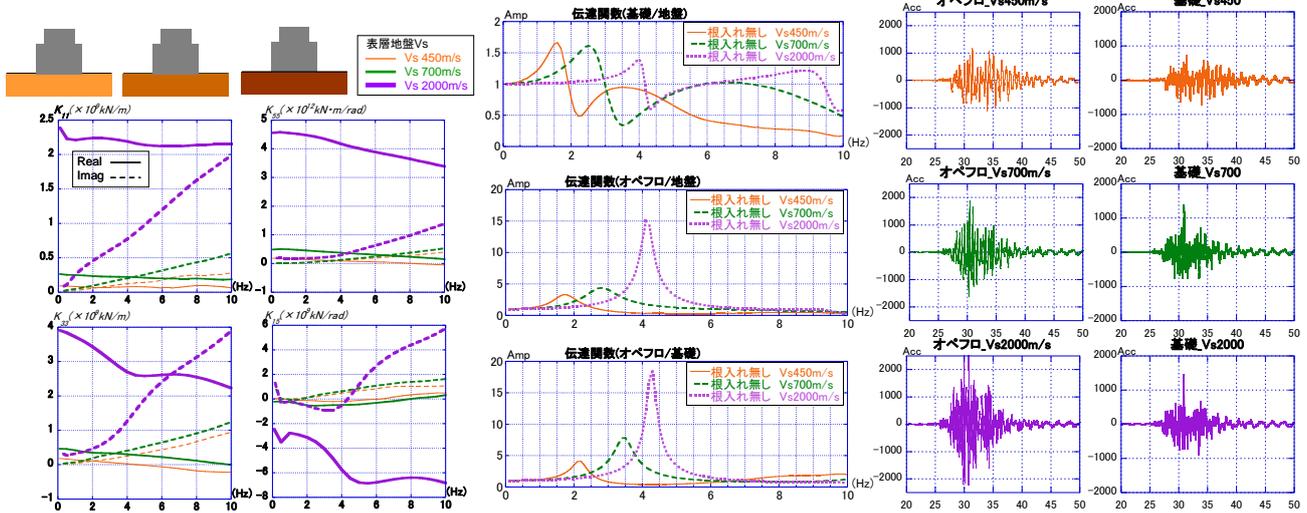


図 18 地盤の固さによる差(左：モデル・インピーダンス、中：伝達関数、右：応答加速度波形)

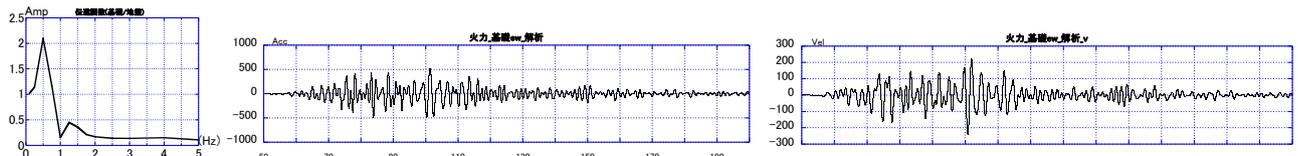


図 19 火力発電所の応答(左：伝達関数(基礎/地盤)、中：応答加速度波形、右：応答速度波形)

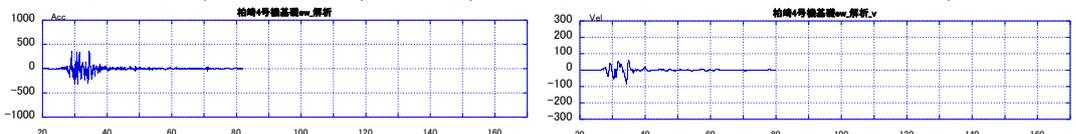


図 20 柏崎刈羽原子力発電所の応答(左：応答加速度波形、右：応答速度波形)