

地震被害は想定通りとなっているのだろうか？

～ 2018年大阪府北部の地震を例に ～

地震防災研究部門 後藤 浩之



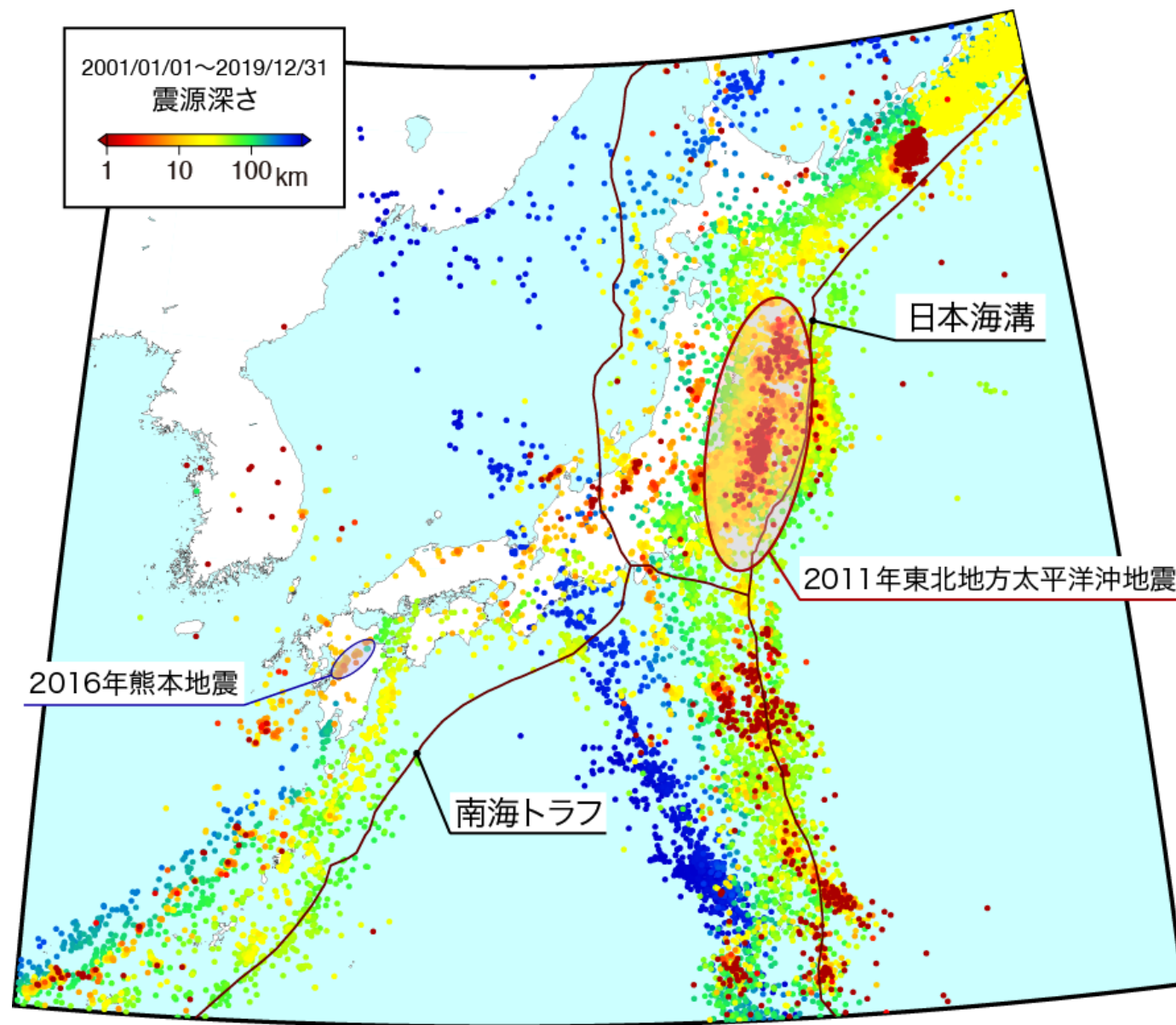
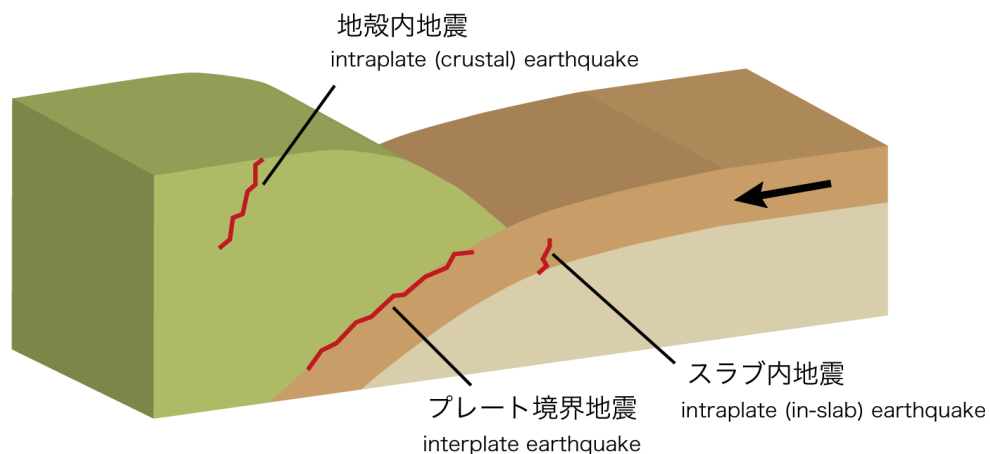
日本の地震活動

世界の約8%の地震が日本列島周辺で発生
プレート境界で発生する地震

(例) 2011年東北地方太平洋沖地震
(東日本大震災)

内陸地殻内地震

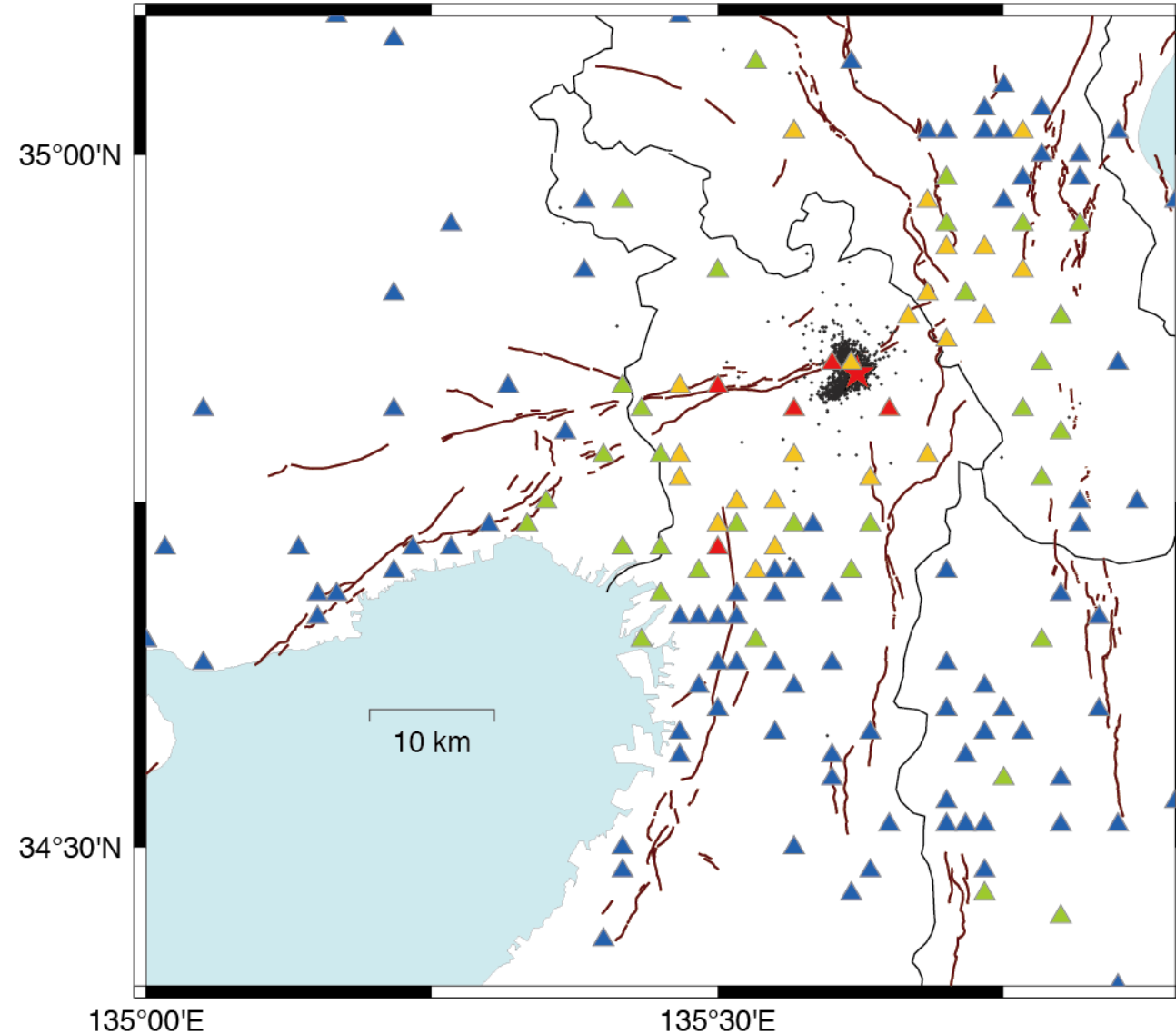
(例) 1995年兵庫県南部地震
(阪神淡路大震災)



2018年大阪府北部の地震

- 発生日時 2018/6/18 7:58
- 震源深さ 13km
- 地震の規模 Mj6.1 (Mw5.6)
- 最大震度 6弱
高槻市, 茨木市,
枚方市, 箕面市, 大阪市北区

- ▲ 震度6弱
- ▲ 震度5強
- ▲ 震度5弱
- ▲ 震度4



被害の概要

平成30年 11月2日 14時00分
大阪府防災・危機管理指令部
連絡先：内線 6021
直通 6944-6021

※前回からの修正は、下線部分

- 人的被害 6名
- 建物
 - 高槻市：全壊11棟，半壊225棟，一部損壊20,087棟
 - 茨木市：全壊3棟，半壊177棟，一部損壊15,739棟
- 河川
 - 国管理：14地点（堤防縦断亀裂，他）
 - 都道府県管理：6地点（堤防縦断亀裂）
- ライフライン
 - 道路：6/18 13時 通行止め解除（NEXCO西日本・阪神高速）
 - 鉄道：6/18 21時頃～ 運転再開（JR西日本 駅間停車 153本），6/23 運転再開（大阪モノレール）
 - 水道：6/19 0時頃～ 順次送水を再開（大阪広域水道企業団 北部水道事業所）
 - ガス：6/20 閉栓完了．6/24 全戸復旧（大阪ガス 約11万戸）

大阪府北部を震源とする地震

1. 被害状況

人的被害及び住家被害（速報値）【11月2日 12時00分時点】

市町村	人的被害（人）			住家被害（棟）※			非住家被害
	死者数	負傷者数	行方不明者数	全壊数	半壊数	一部損壊	
合計	<u>6</u>	369	0	<u>18</u>	<u>512</u>	<u>55,081</u>	817

市町村詳細は、別添「市町村別被害状況」のとおり

※ 死者数等については、災害関連であるかどうか確認中の者あり。

※ 住家被害状況については、集計中の市町あり。

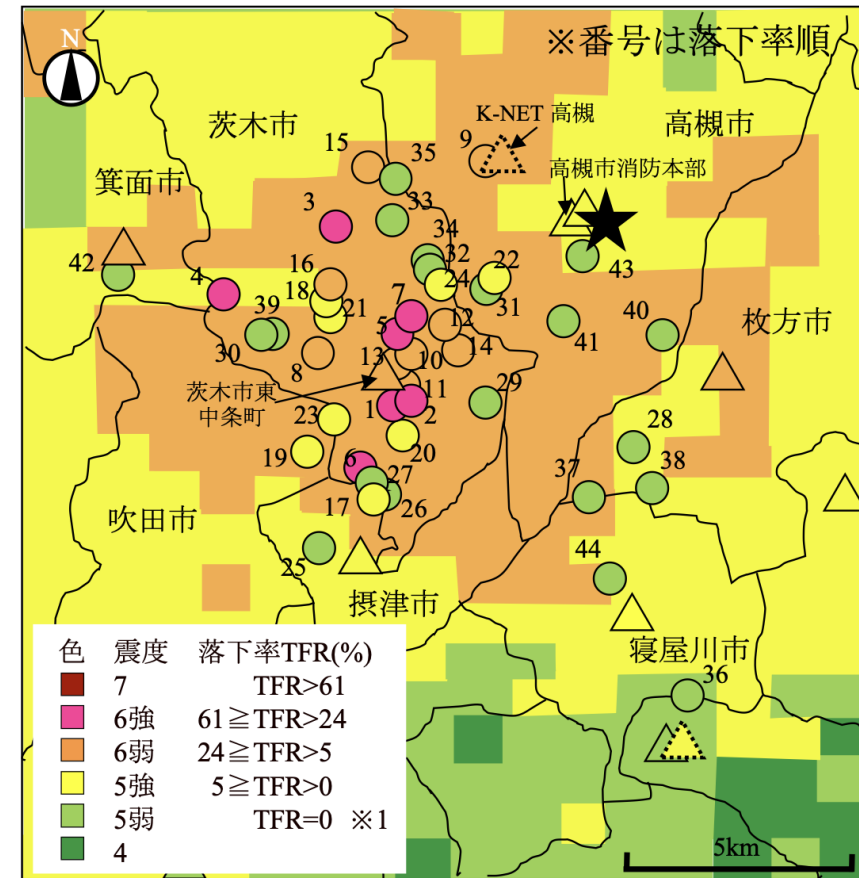
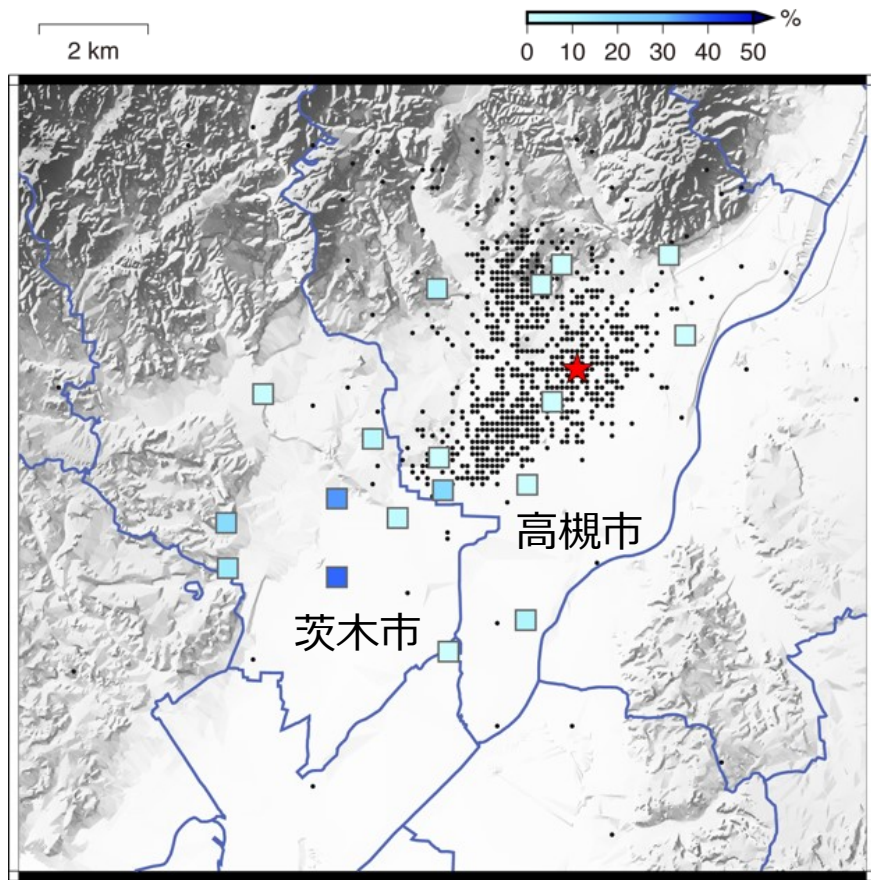
被害を俯瞰的に把握するために

- 墓石等（単体）の被害状況から，被害の空間特性を把握する調査がなされた



墓石転倒率

- 墓石の転倒率は高槻市内より茨木市内の方が高い傾向にある



建物被害状況の整理

- 高槻市・茨木市の罹災証明書発行数データを用いて整理

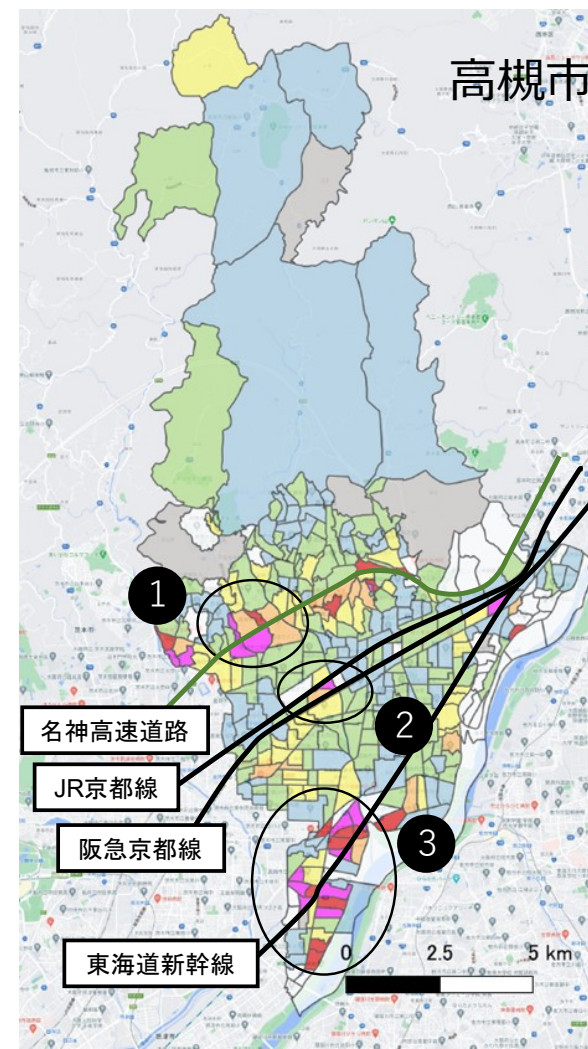
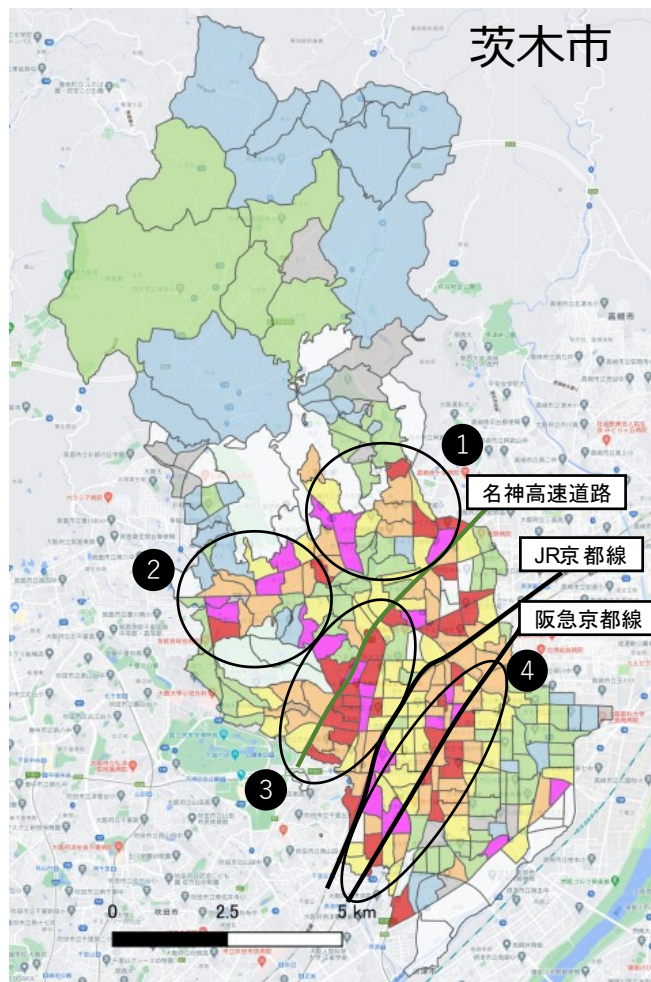
浅野晃太, 後藤浩之, 奥村与志弘, 澤田純男: 2018年大阪府北部の地震における高槻市・茨木市の建物被害分布と要因に関する地理学的考察, 土木学会論文集A1, 77(4), I_638-I_648, 2021.

被害率の定義

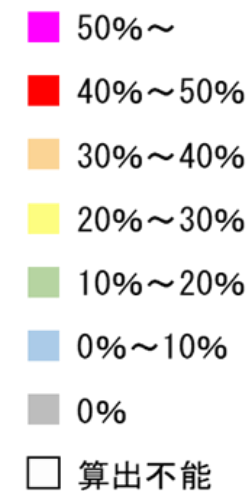
高槻市:
 $\text{罹災証明書発行数} / \text{世帯数}$

茨木市:
 $\text{罹災証明書発行数} / \text{建物棟数}$

建物被害率に偏り
(被害集中域) がある

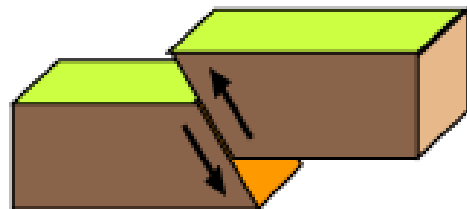


建物被害率
(一部損壊以上)



被害が生じるためには

ハザード



脆弱性

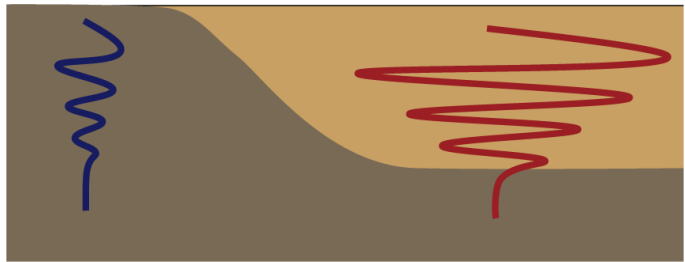


災害

被害が生じるためには

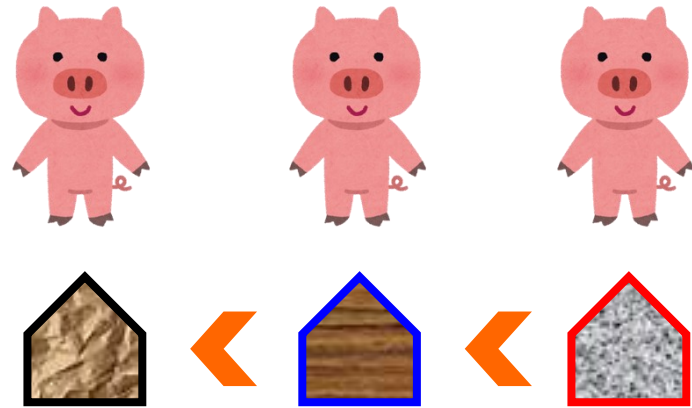
ハザード

- ① 地震の発生メカニズム？
- ② 揺れやすさの違い？



脆弱性

- ③ 建物の違い？



災害

地震の規模と揺れの大きさ

地震の規模 Mj6.1 (Mw5.6)

土木学会：土木建造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」，2000.

2. 耐震設計に用いるレベル2地震動

(1) レベル2地震動は、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動であり、内陸および海溝で発生する地震の活動履歴、震源断層の分布と活動度、活断層から当該地点に至る地下構造、当該地点の地盤条件、および強震観測結果などに基づいて設定する。

(2) レベル2地震動の設定では、震源断層の破壊過程や地盤条件の評価などに多くの不確定性が残されていることを十分に認識するとともに、地震動の予測手法の適用性や予測結果の妥当性についての十分な吟味が必要である。

さらに、地震動予測の精度を向上させるために、この分野に関わる最新の研究成果を取り入れ、地震動の予測手法を更新していくことが必要である。

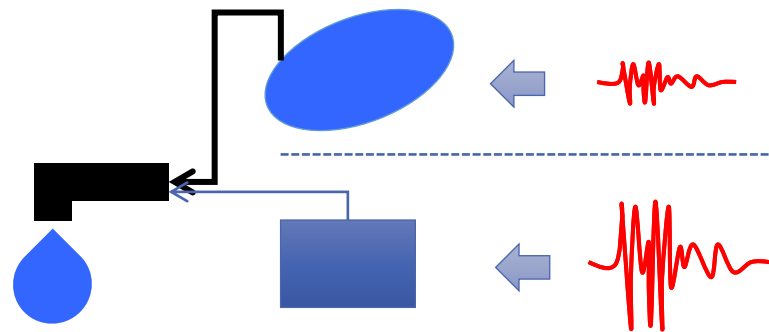
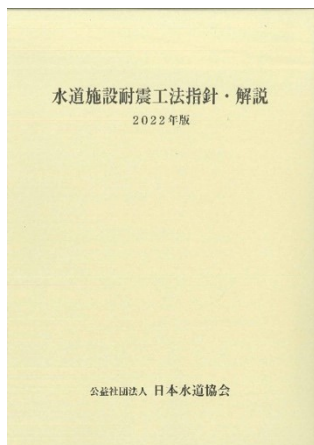
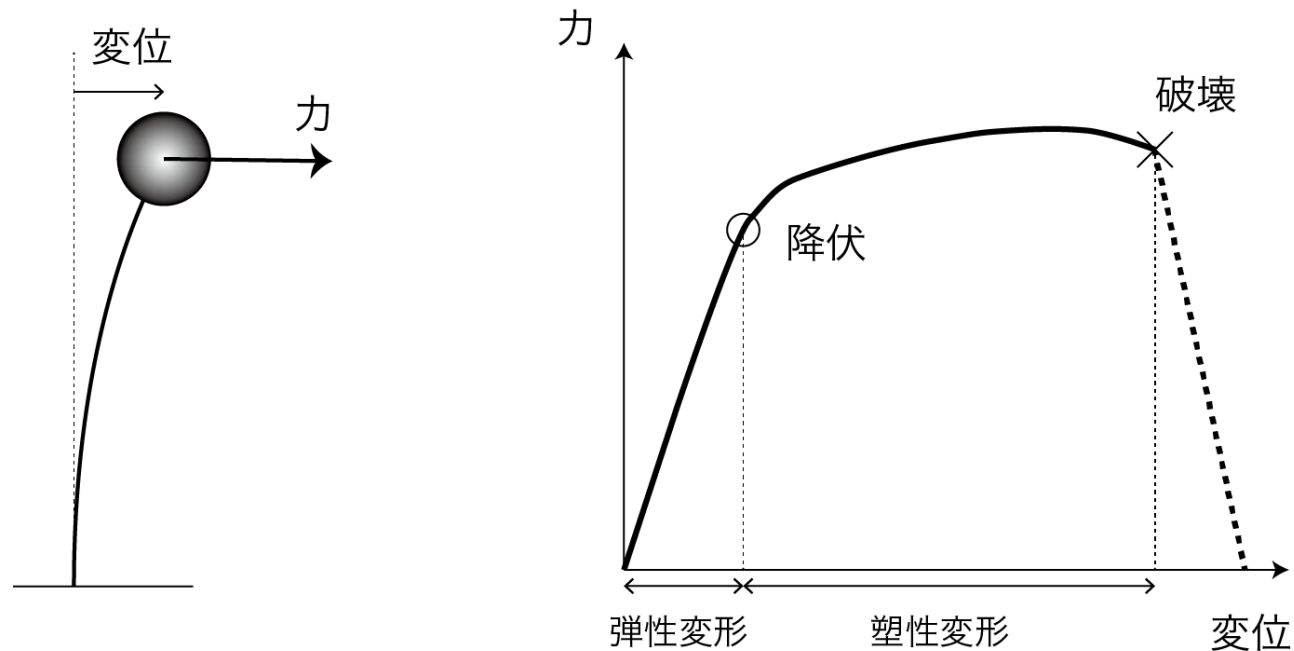
(3) 対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合でも、レベル2地震動の設定に当たってはマグニチュード6.5程度の直下地震が起こる可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。

(4) レベル2対象地震は、単一の地震に限定する必要はなく、複数の地震が選定されてもよい。また、同一地点のレベル2対象地震であっても、対象とする建造物の動的力学特性によって結果として対象地震が異なることがありうる。

既存の活断層が認められなくても
M6.5程度 の直下地震を想定する

耐震設計上、安全性の照査において考慮されている規模の地震

安全性の照査とは

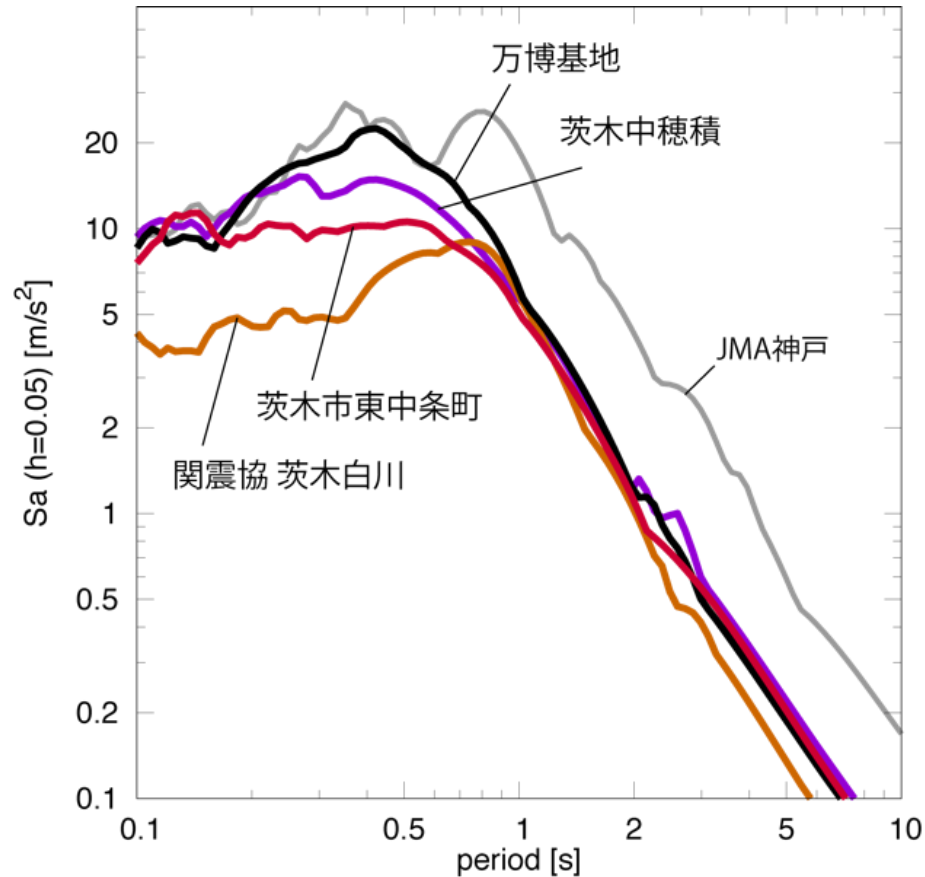
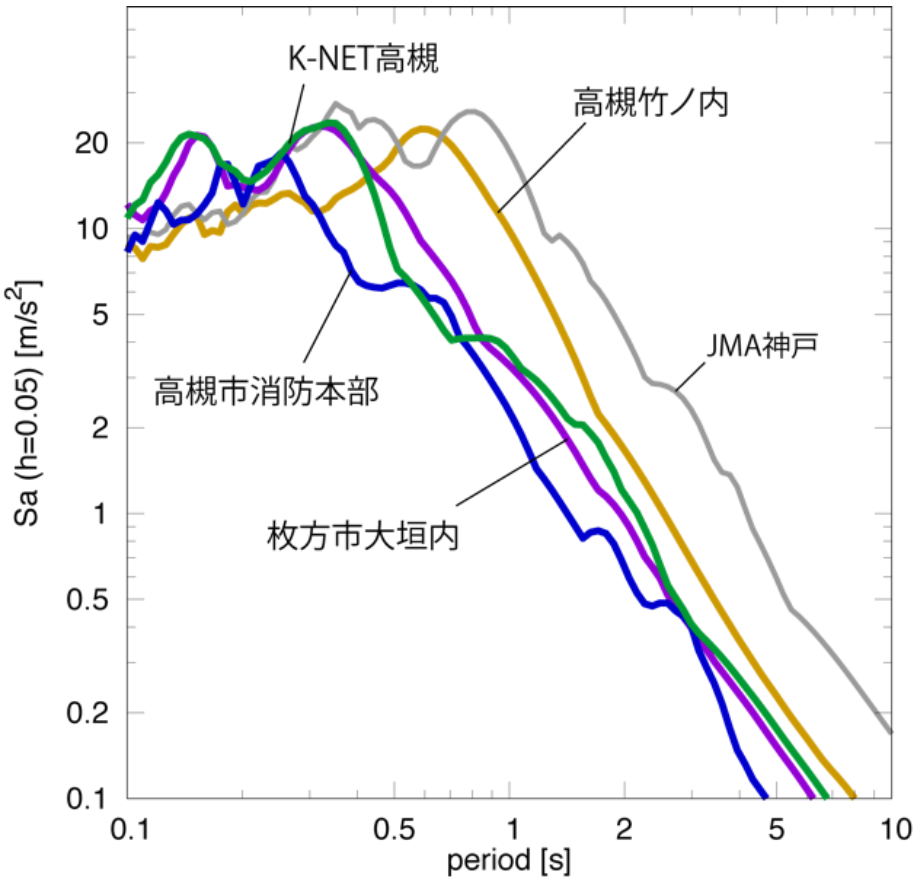
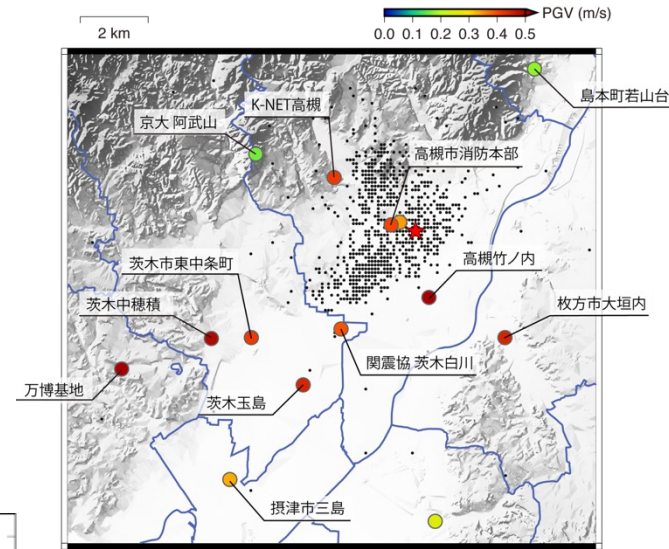


生じる可能性の高い作用に対しては
継続的に使用できるように

最大規模の作用に対しては
施設機能に重大な影響を及ぼすような損傷
が発生せず、利用者や周辺の人々の生命や財
産を脅かさない

地震動の大きさ

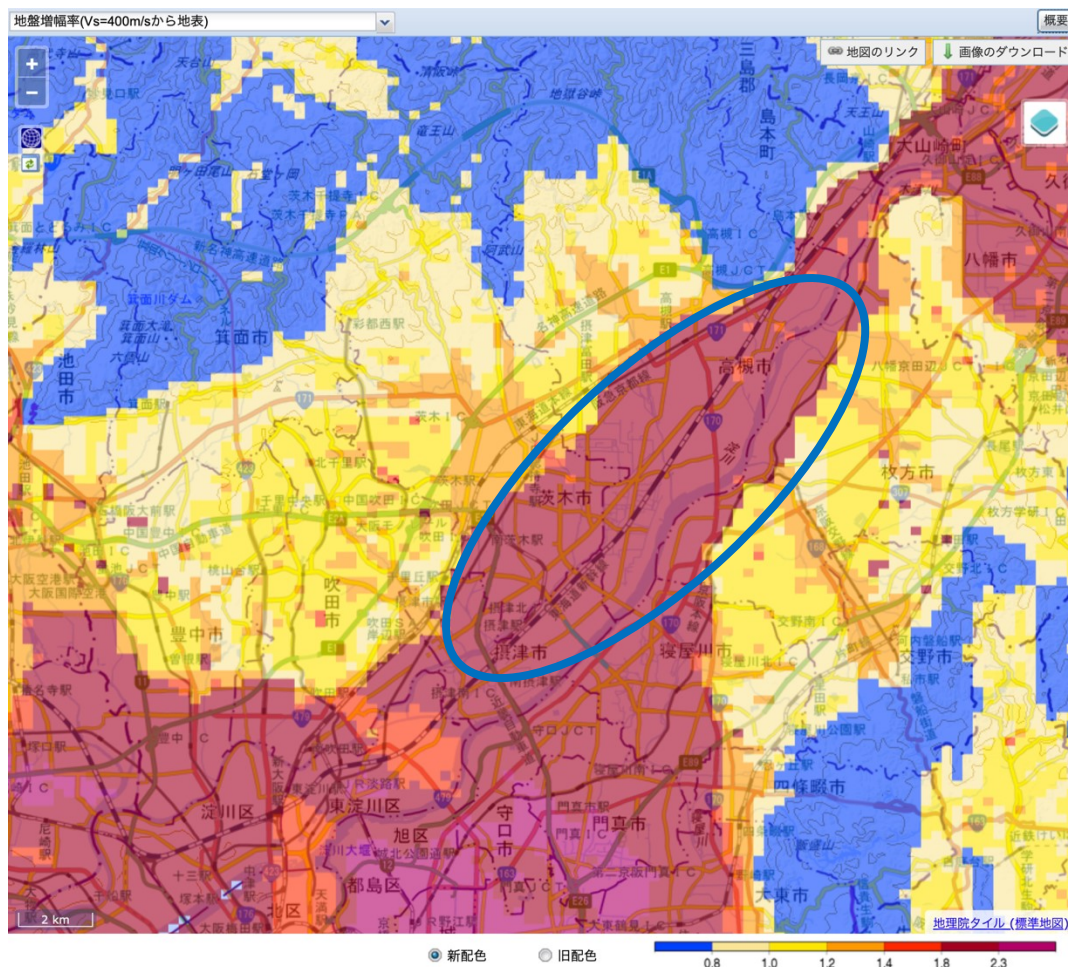
- 観測された地震記録を応答スペクトルで比較する
- 兵庫県南部地震の記録（JMA神戸）を概ね下回る



揺れやすさの違いはあったのか

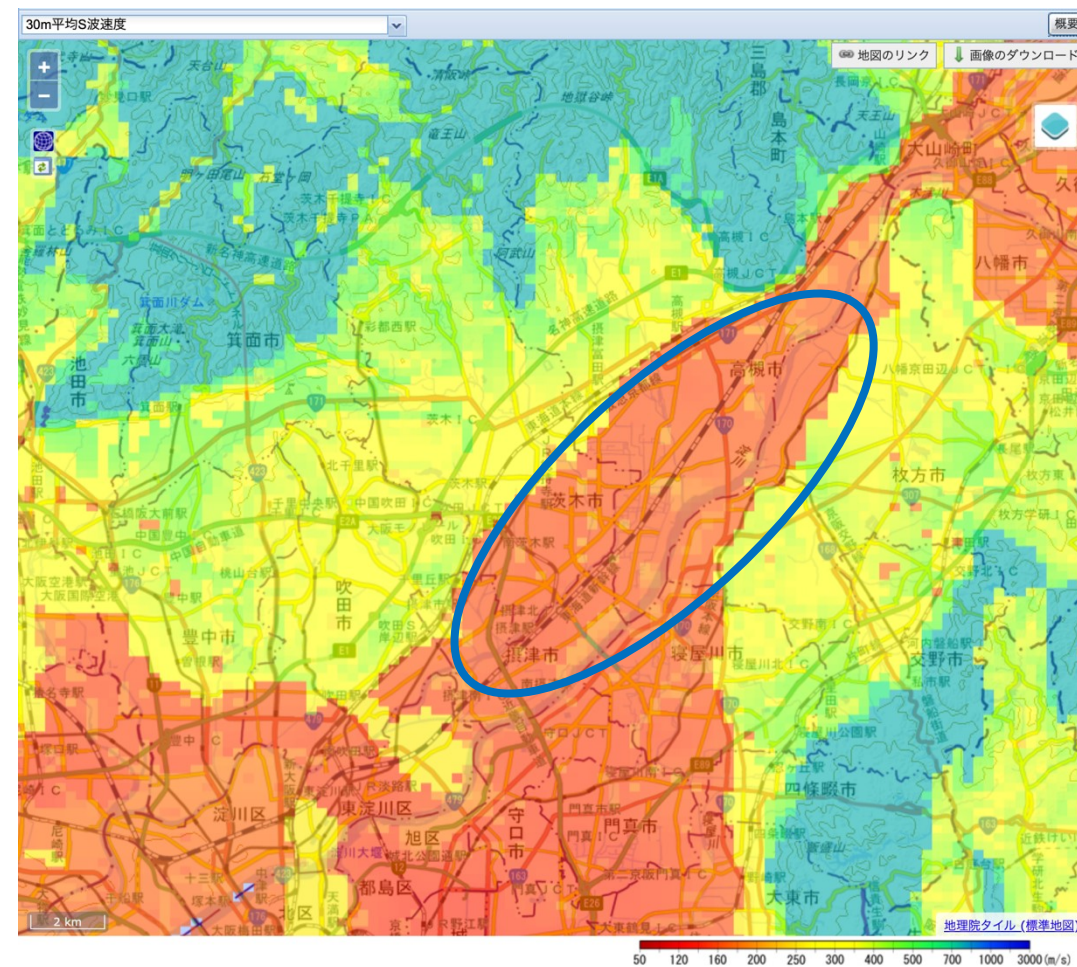
- 淀川に沿った平野部で、高い地盤増幅率が想定されている

地盤増幅率 (地震ハザードステーション)



深さ30kmまでの平均S波速度

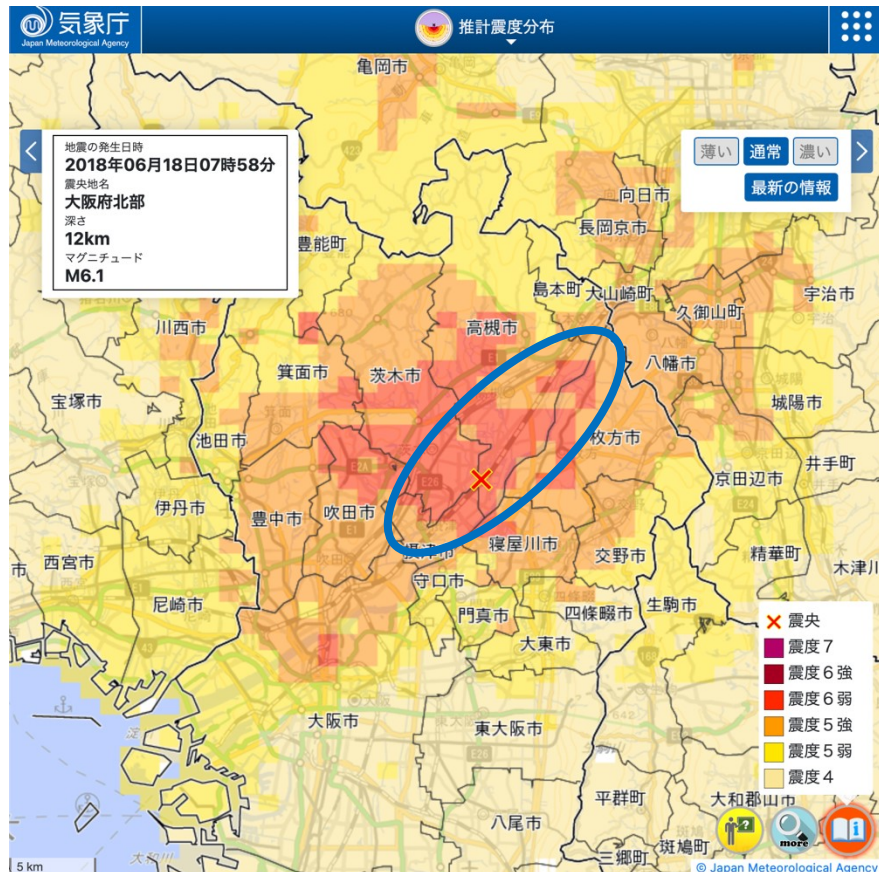
Vs30 (地震ハザードステーション)



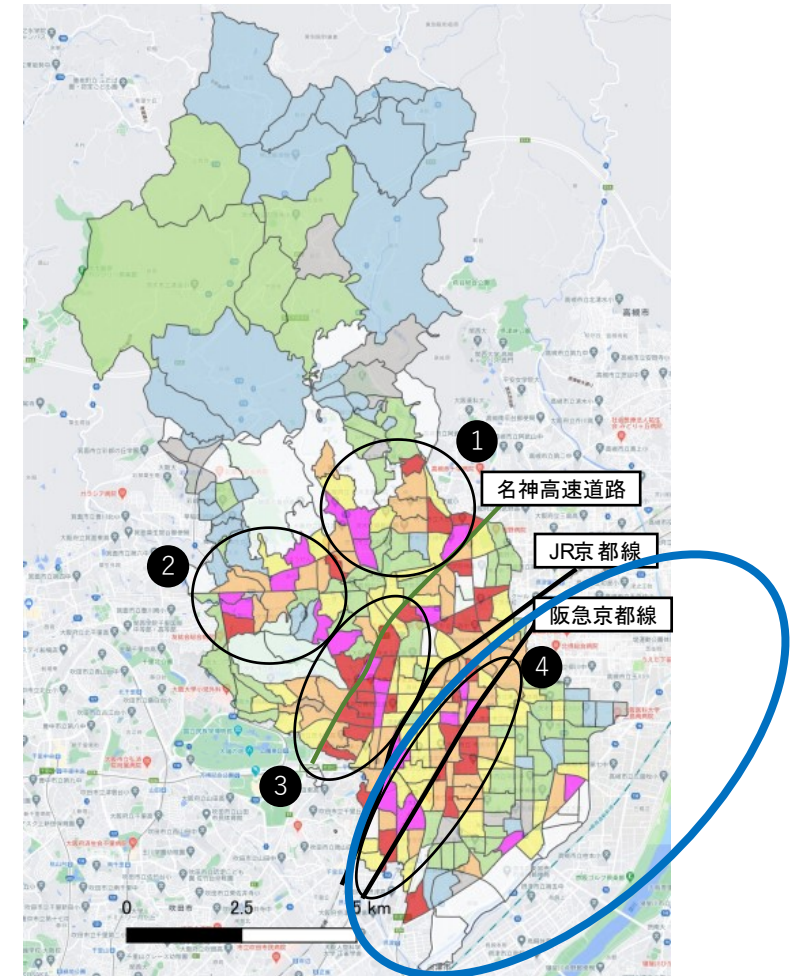
揺れやすさの違いはあったのか

- 推定震度分布では高い震度が予想されたが、実際の建物被害は顕著でない

推計震度分布（気象庁）

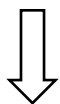


罹災証明書による 建物被害率（茨木市）



建物被害率とVs30

建物被害率とVs30が対応しない
(想定された状況ではない)

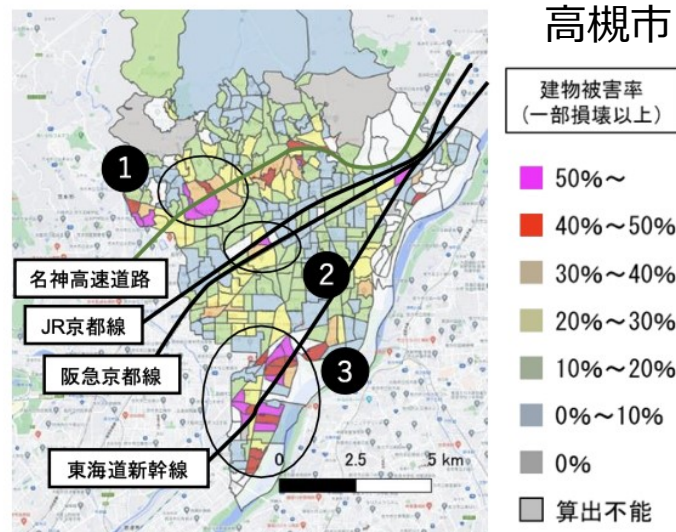


考え得る理由

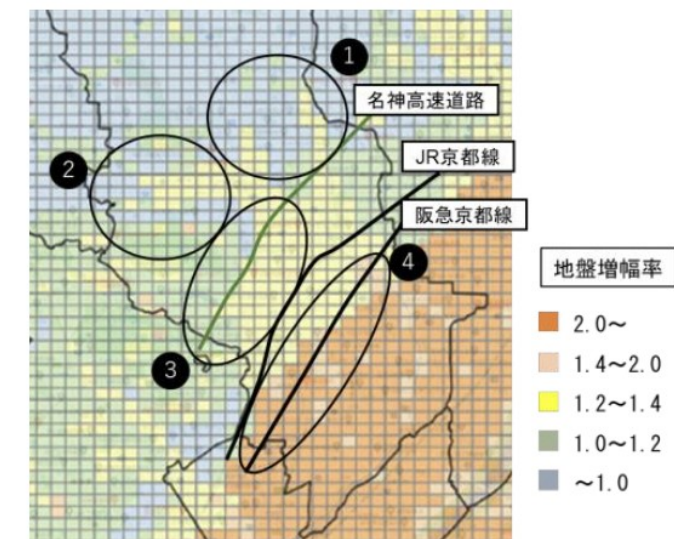
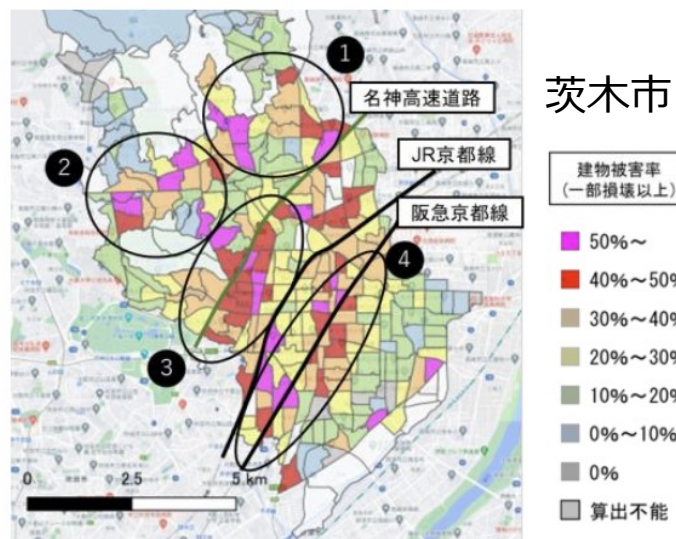
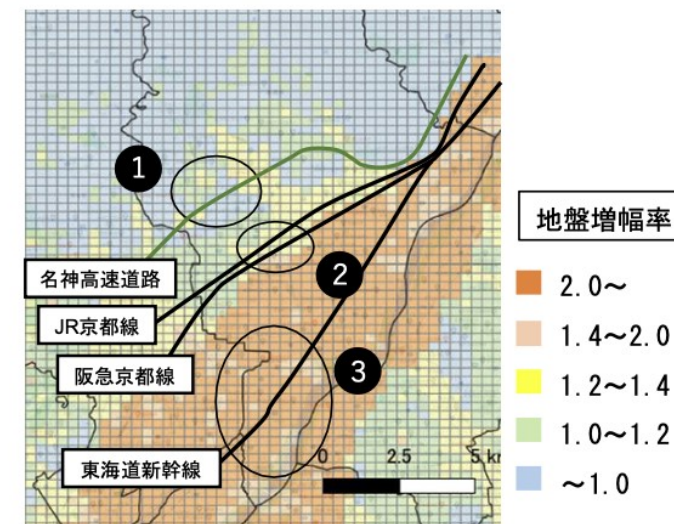
1. 建物種別が地域毎に異なる
2. Vs30で表現されていない局所的な地震動の増幅

詳細な検討を進める必要があった

建物被害率



Vs30 (J-SHIS)



浅野晃太, 後藤浩之, 奥村与志弘, 澤田純男: 2018年大阪府北部の地震における高槻市・茨木市の建物被害分布と要因に関する地理学的考察, 土木学会論文集A1, 77(4), I_638-I_648, 2021.

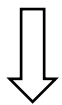
街の形成過程による影響（高槻市）

浅野晃太, 後藤浩之, 奥村与志弘, 澤田純男: 2018年大阪府北部の地震における高槻市・茨木市の建物被害分布と要因に関する地理学的考察, 土木学会論文集A1, 77(4), I_638-I_648, 2021.

局所的に被害率の高い地域は, 土地利用の変遷によって説明できる場合がある

高度経済成長期に開発

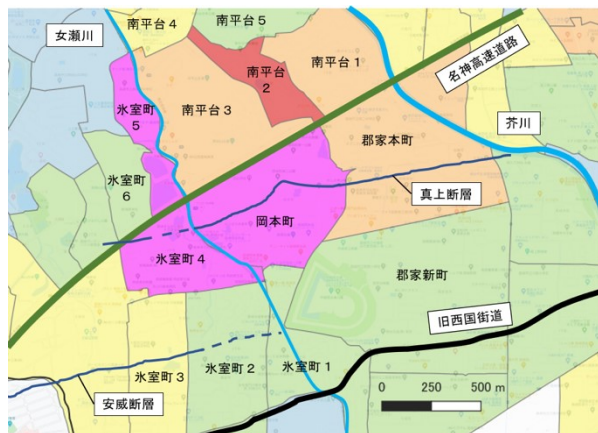
- 盛土造成
- 池の埋立て



局所的な地盤増幅

局所的に脆弱な建物

被害率



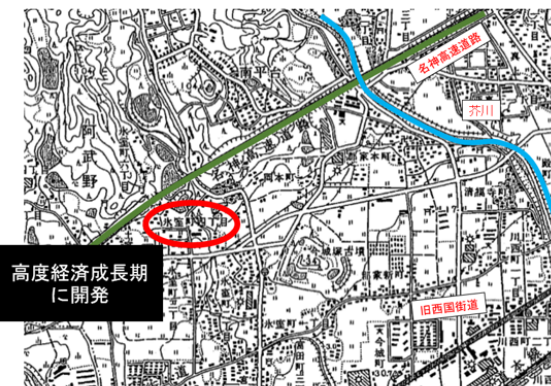
造成盛土



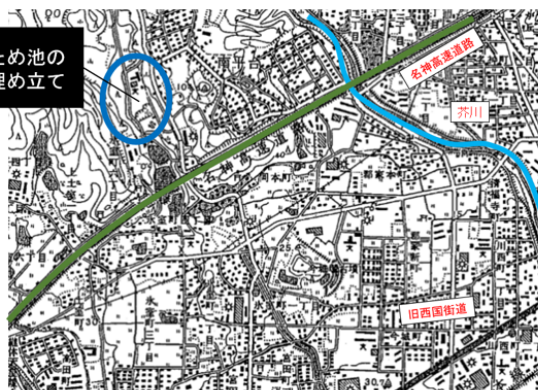
新旧地形図比較



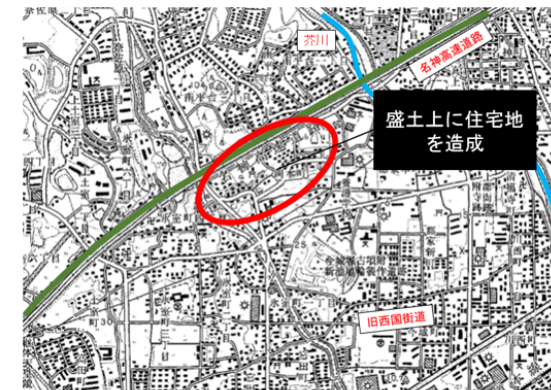
1922年



1970年



1979年



1998年

街の形成過程による影響（茨木市）

局所的に被害率の低い地域は，街の形成過程で説明できる場合がある

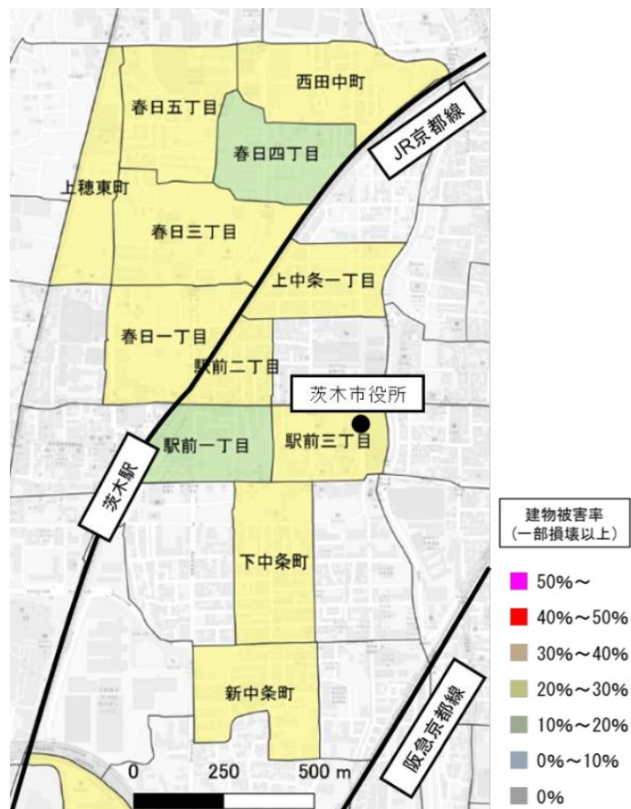
高度経済成長期に市街地形成

...しかし，1970年代までの開発は多くが企業オフィスや社宅



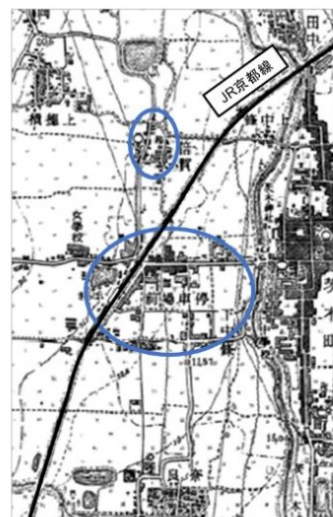
2000年頃までに多くが立て替えられ，集合住宅等へ

被害率



新旧地形図比較

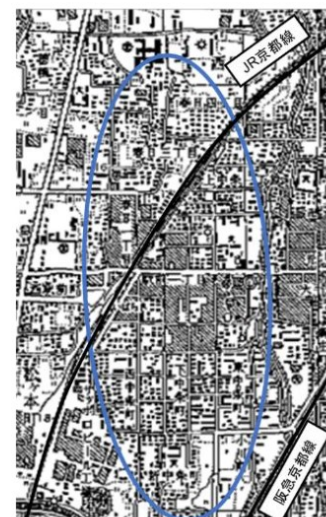
1923



1959

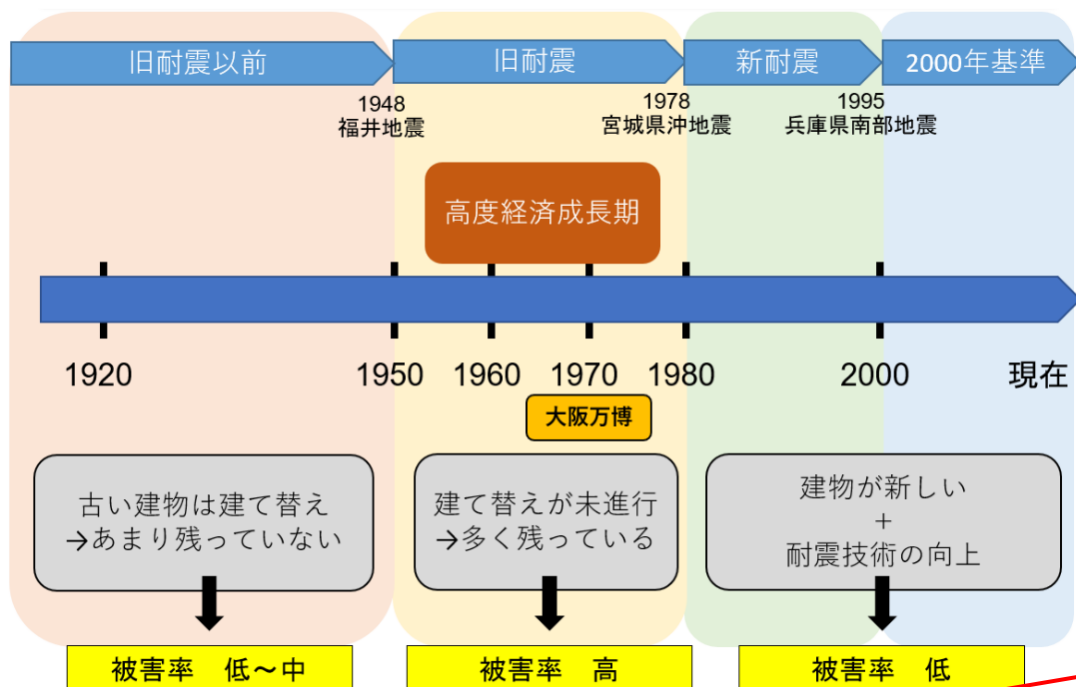


1972

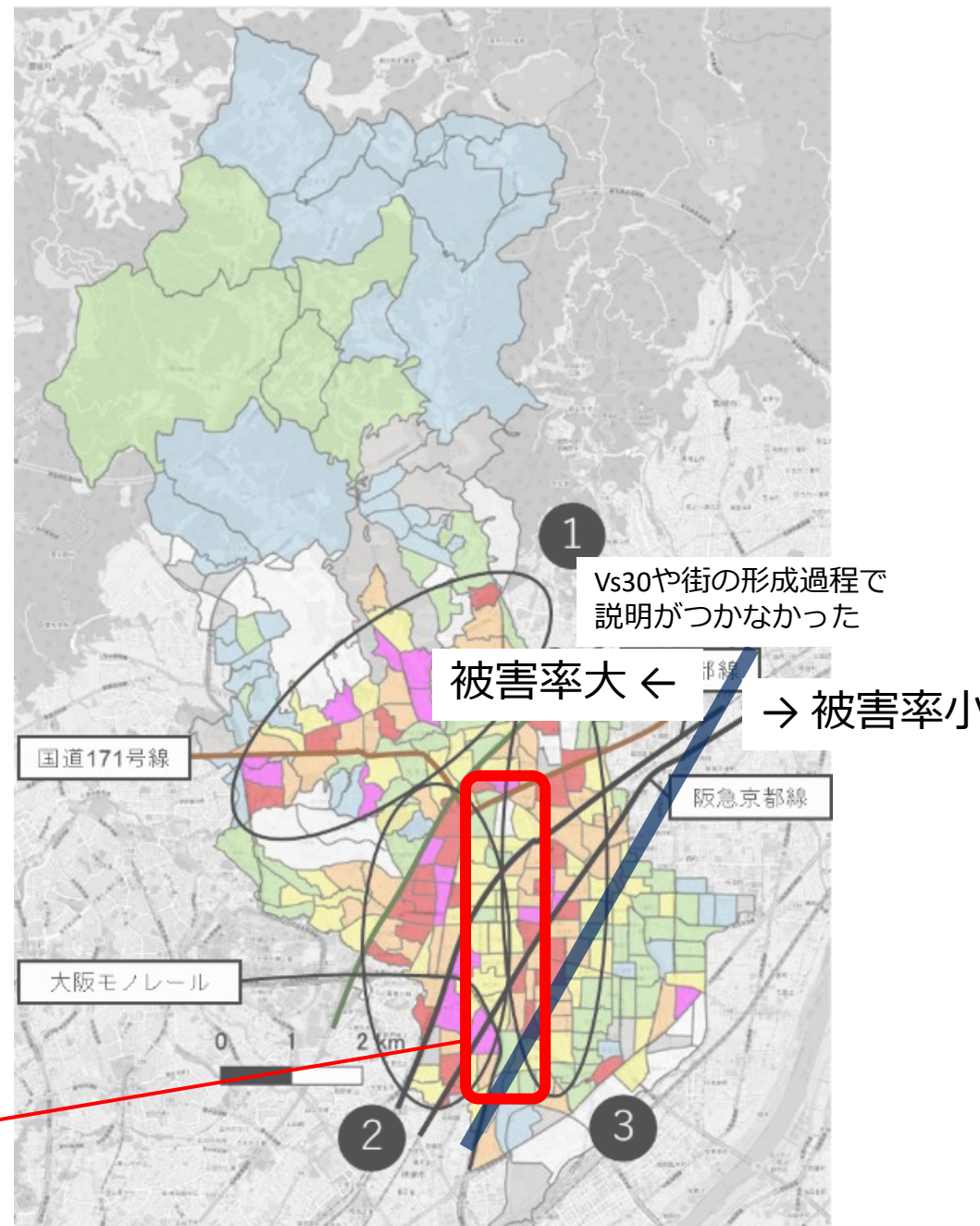


街の形成過程による影響

- 全体的な傾向として高度経済成長期に開発された地域は被害率が高いが、例外もある
- 街の形成過程だけで説明できない地域もある



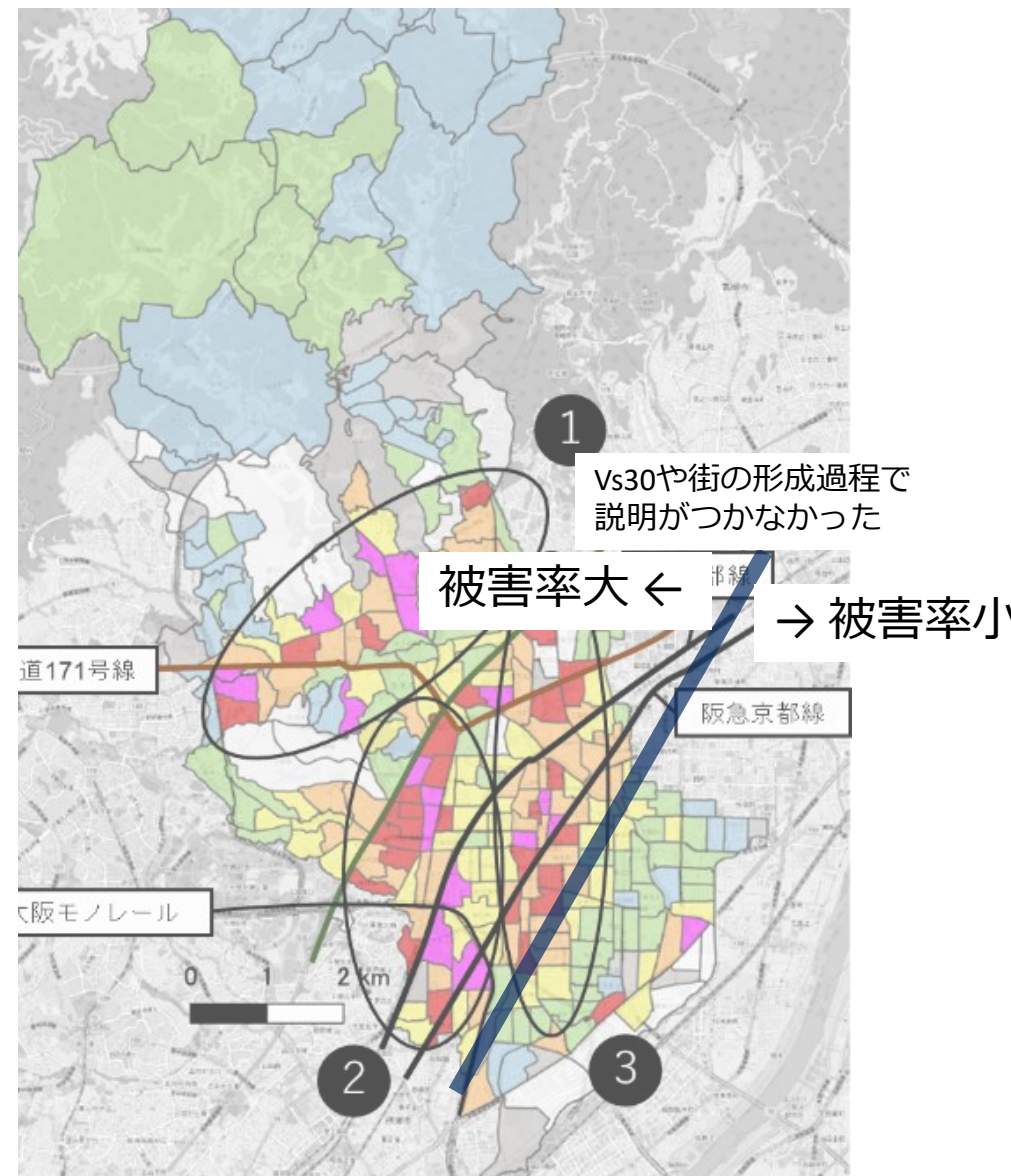
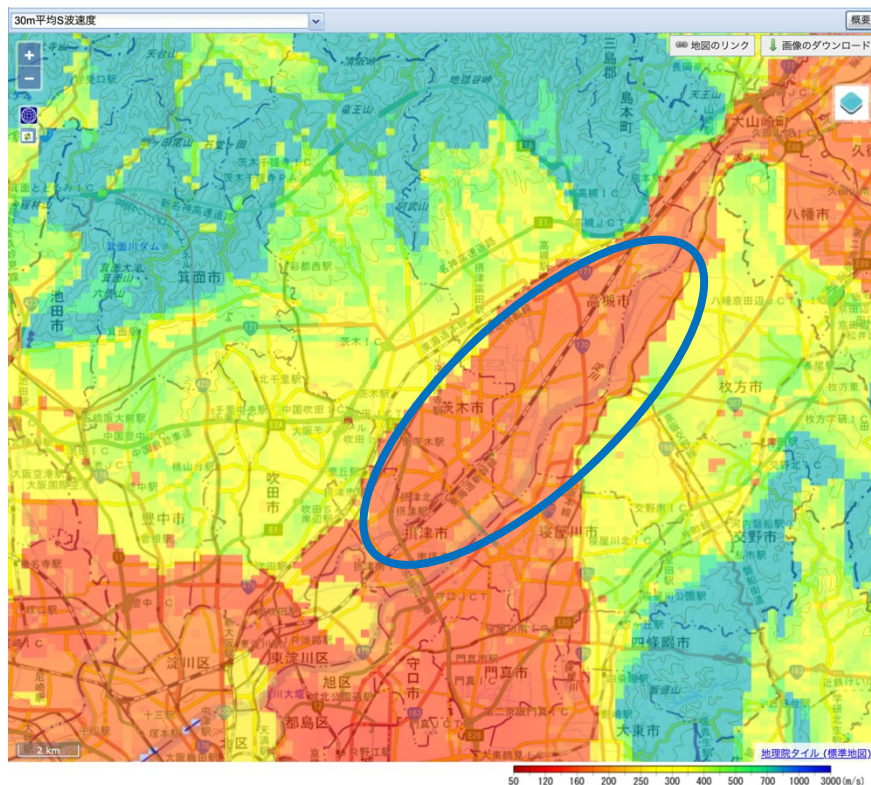
例外：エリアD（春日・中条周辺）



建物被害分布はどのように説明できるのだろうか？

- 街の形成過程では被害分布を全て説明することができない
 - ✓ 特に淀川沿いの平野部で被害率が低い傾向を説明できない
 - ✓ Vs30で表される地盤増幅度は逆傾向である

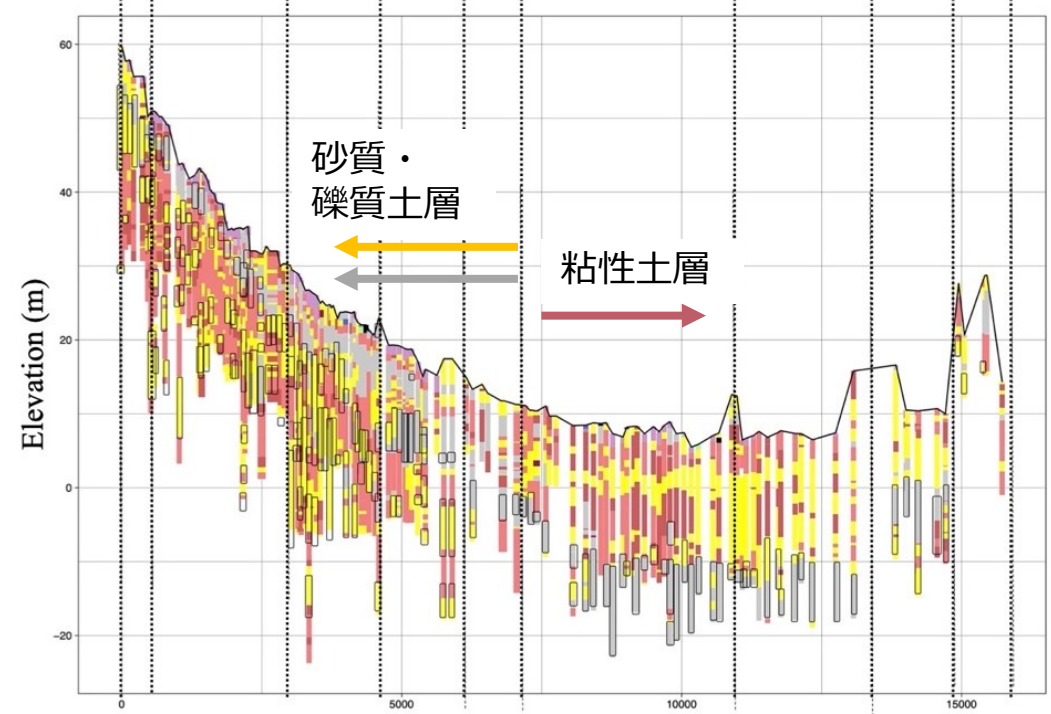
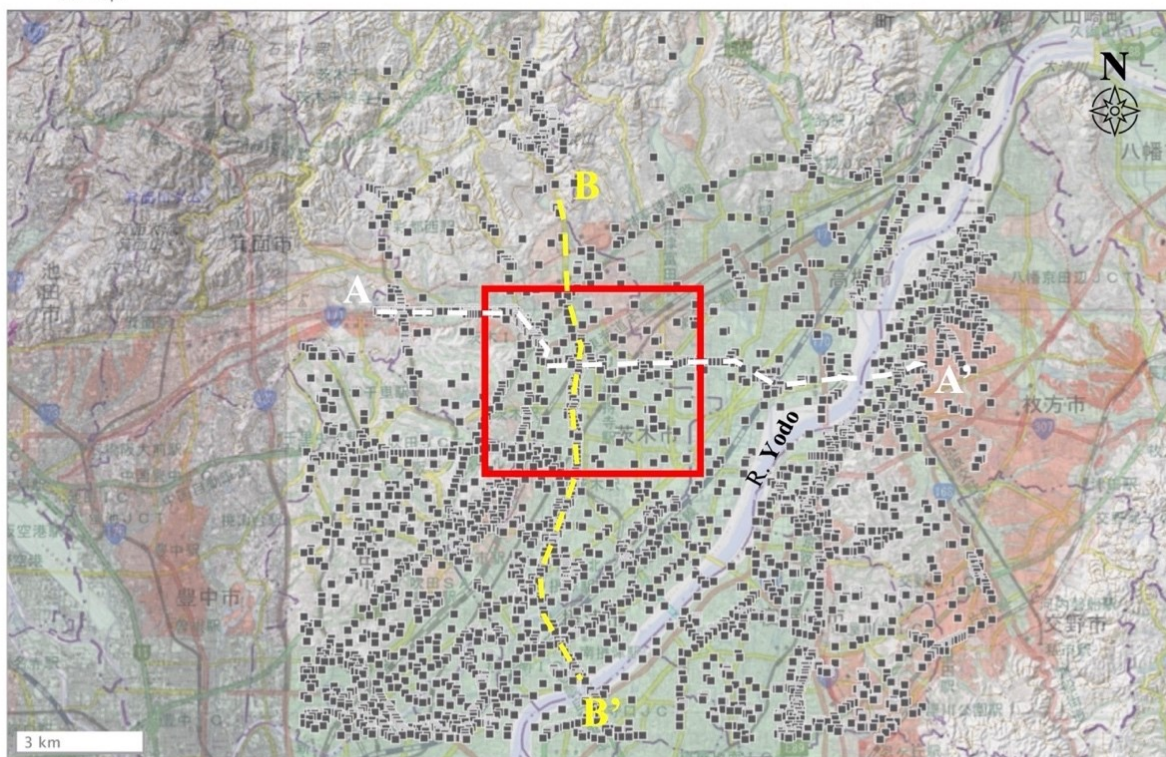
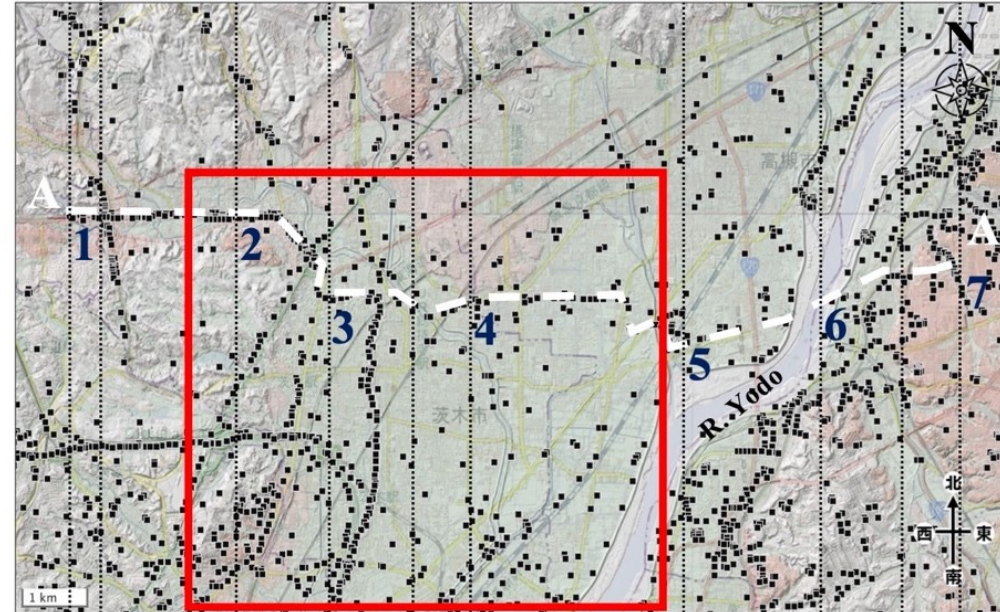
Vs30 (地震ハザードステーション)



詳細な地盤情報の確認

茨木～高槻の東西断面

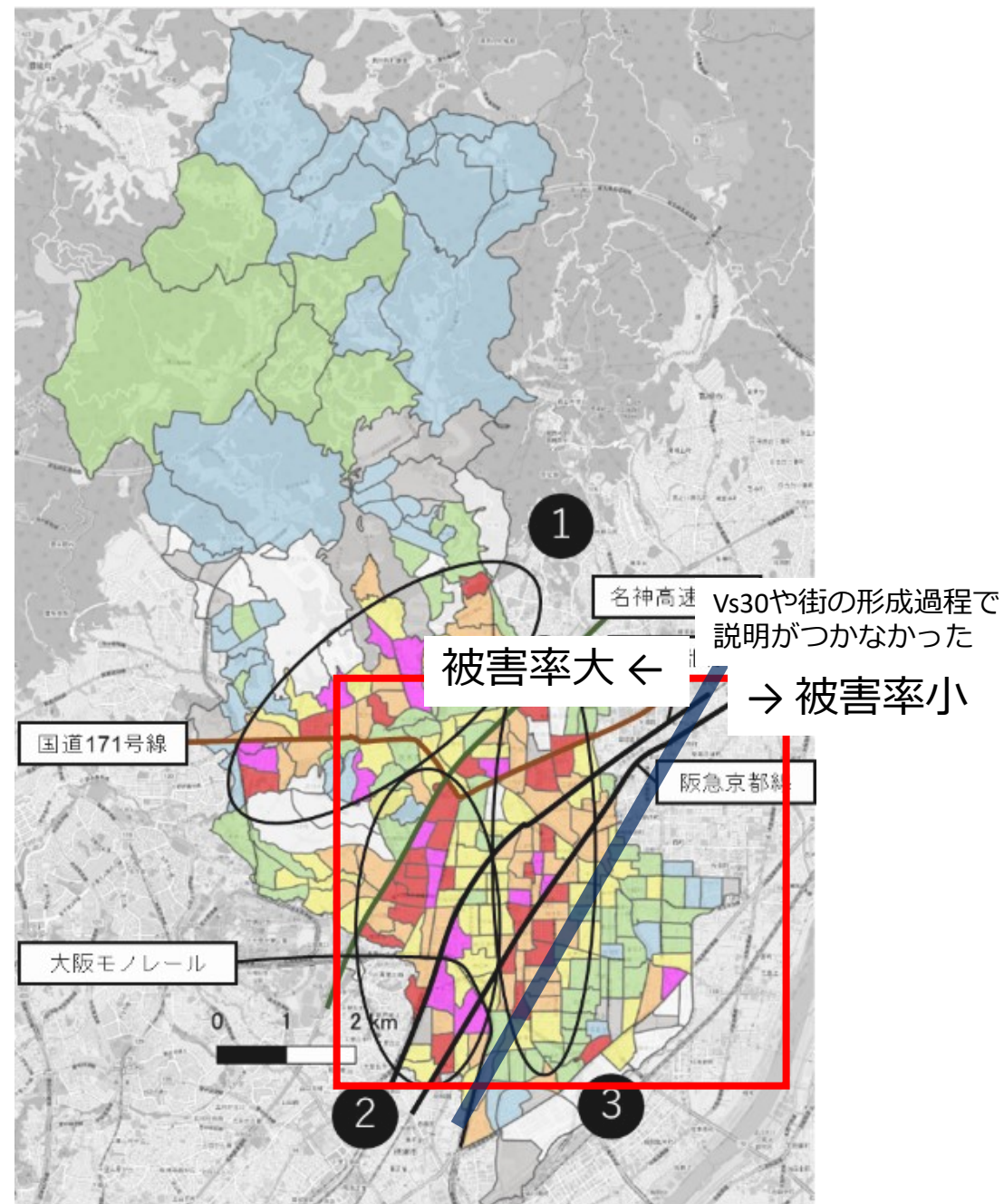
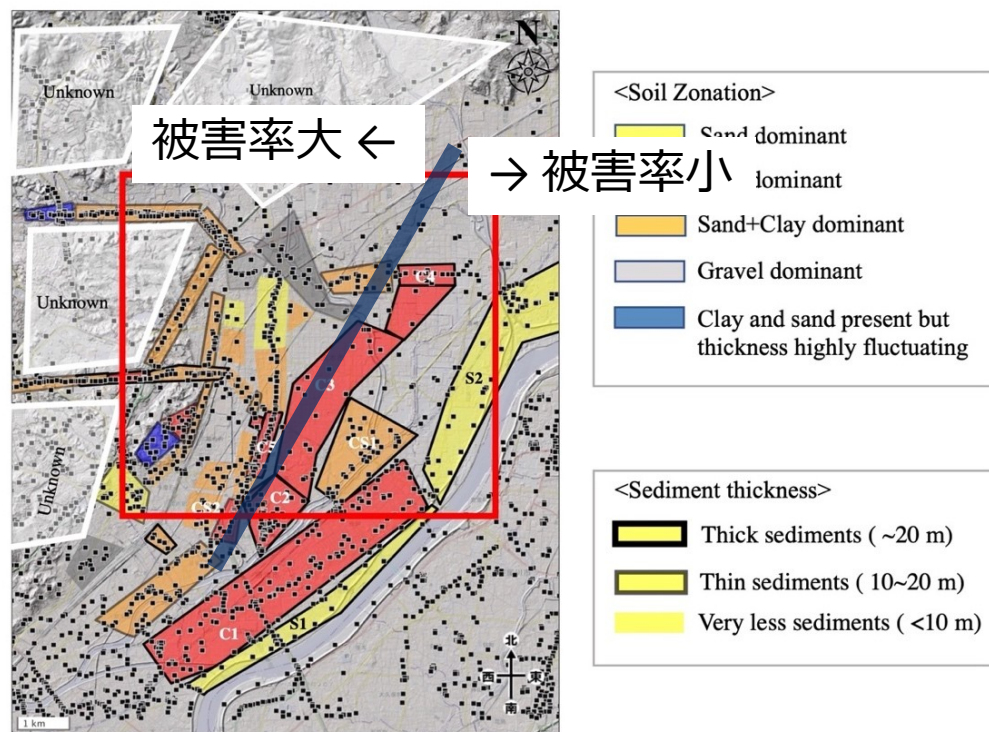
- 千里丘陵～ 礫層
- 千里丘陵～安威川 砂質土主体 薄い礫層
- 安威川～ 厚い粘性土層



Distance along A-A' (m) (Chakraborty et al., 2023)

表層地質と建物被害率

- 川沿いの平野部は粘性土主体である
- 被害率の変化は、土質の変化とよく対応する
 - ✓ 砂質土主体 建物被害率が高い
 - ✓ 粘性土主体 建物被害率が低い



地盤の震動特性を直接測る

余震観測

- 茨木市内：5点
- 高槻市内：1点
- 既存強震観測点とバランス
- 期間：2018/6/19～6/26

IBR02



IBR03



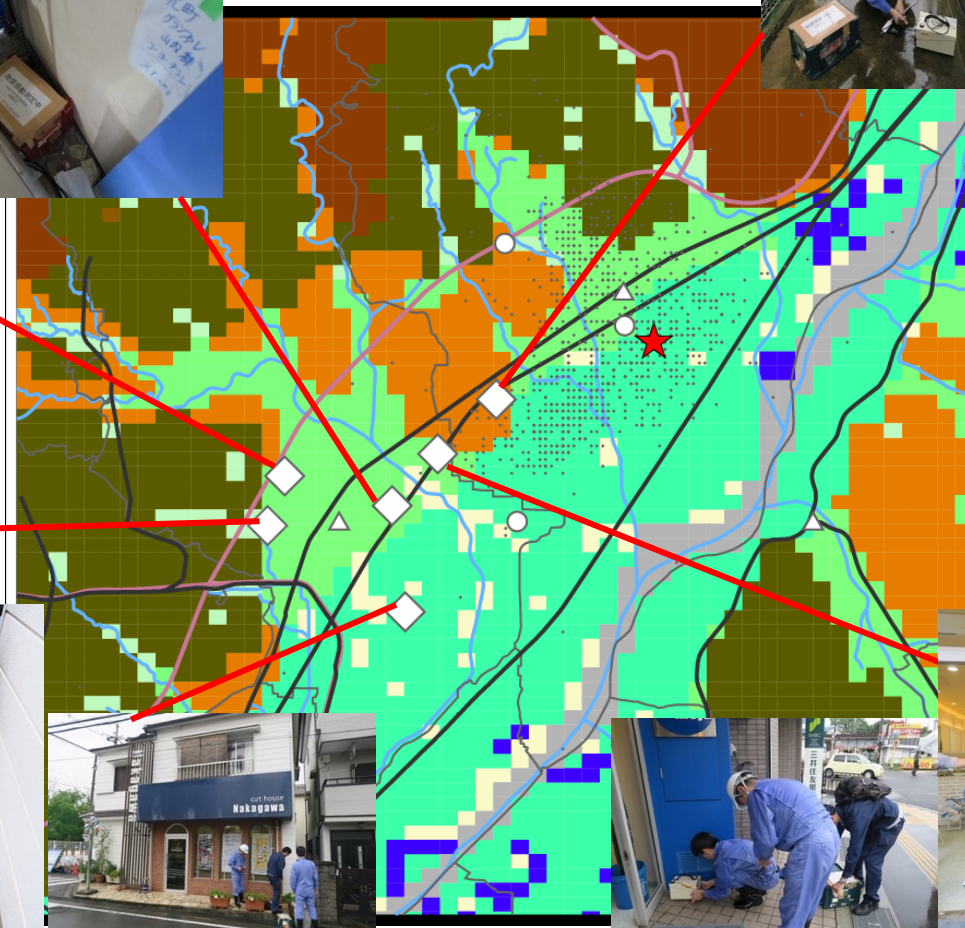
TKT02



IBR01



IBR05

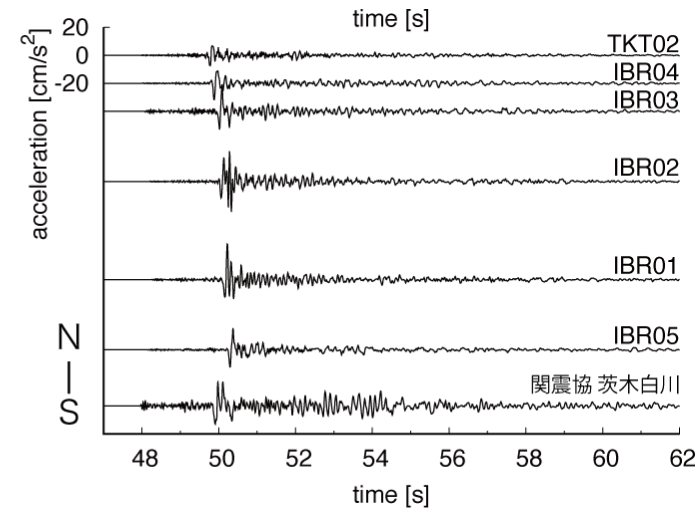
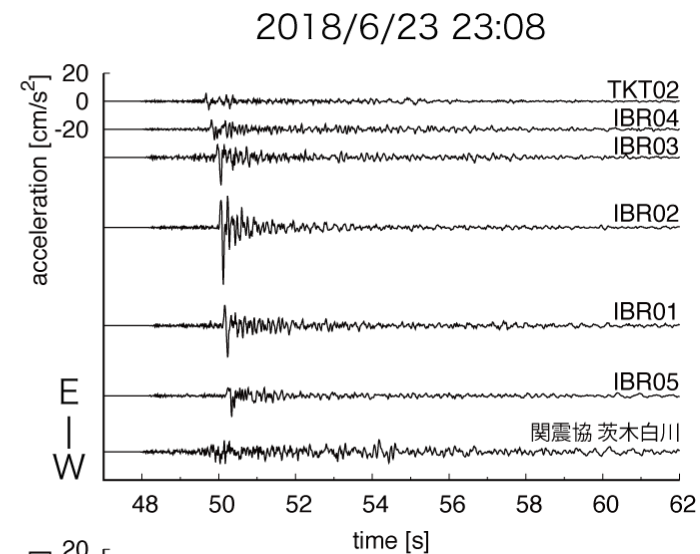
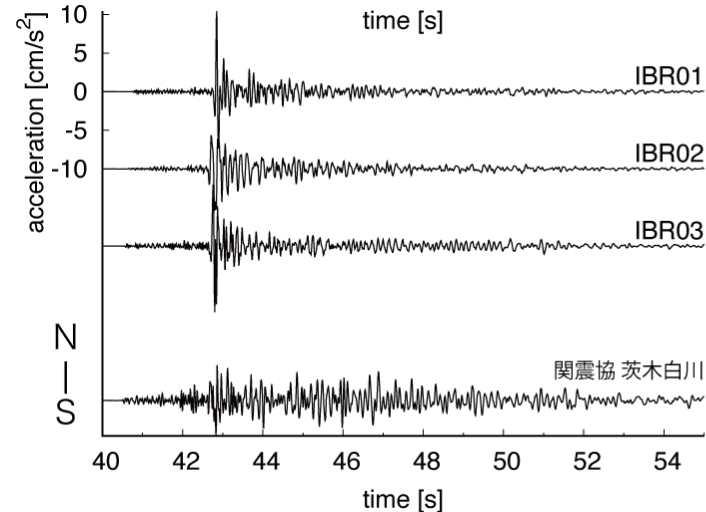
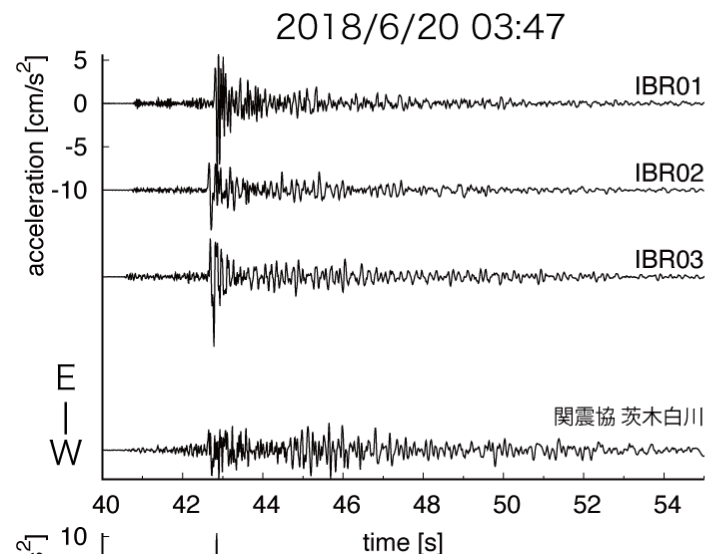
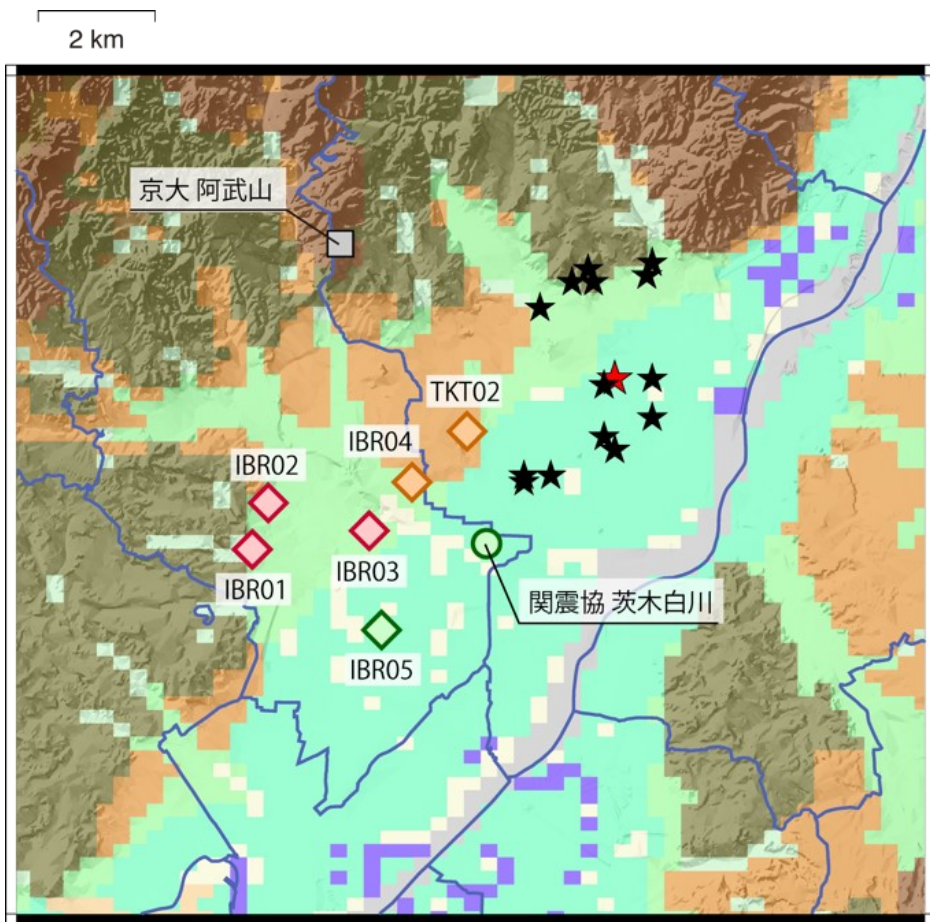


IBR04



余震観測記録

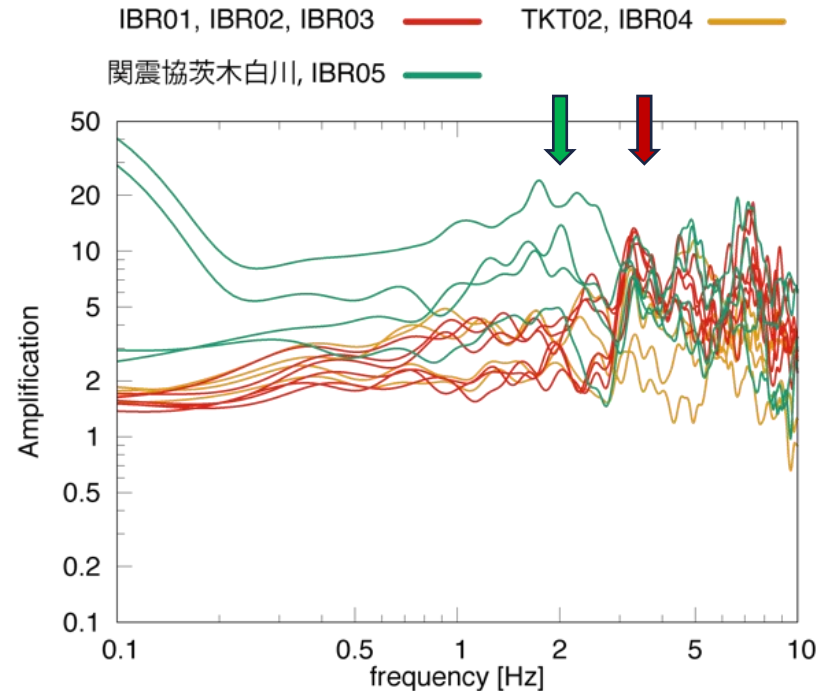
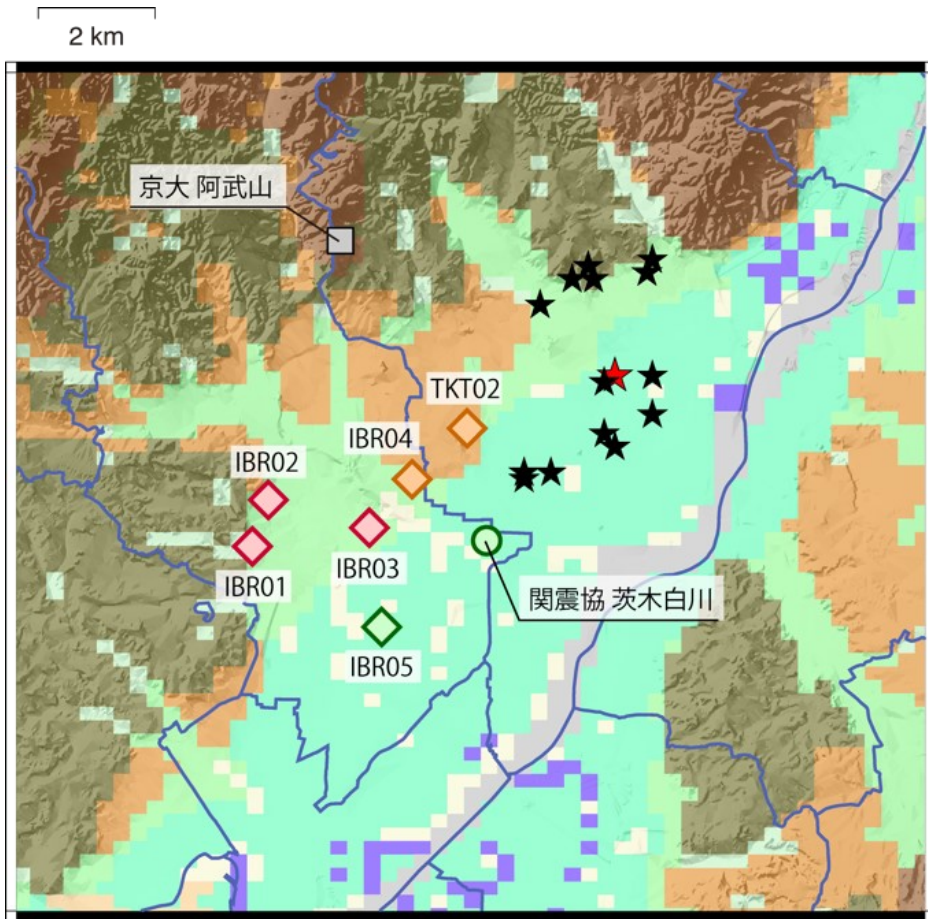
- IBR01, IBR02, IBR03 はパルス状の波形で振幅も大きい



余震観測記録

- IBR01, IBR02, IBR03 はパルス状の波形で振幅も大きい
- 茨木白川やIBR05は2Hz程度にピーク. IBR01-03は3-4Hzにピーク.

⇒ 地盤震動特性はやはり違う



余震観測点／阿武山（岩盤）
のスペクトル比

地盤の震動特性と応答

以下で実際に試してみることができます
<http://www.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~goto/contents/>

- 長い周期の波が入射する場合

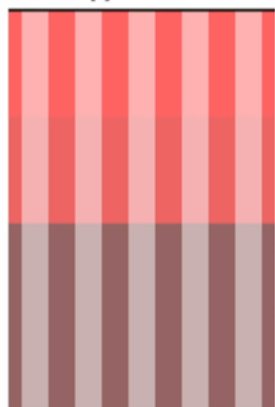
地盤の地震動増幅特性 - Site amplification

地震動が表層地盤でどの程度増幅するかを計算します

Calculate a site amplification under ground motion excitation

→ 専門家の方へ

time 0.00 [s]



Layer #1: Vs = 100 [m/s]



thickness = 4 [m]



Layer #2: Vs = 200 [m/s]



thickness = 4 [m]



Layer #3: Vs = 700 [m/s]

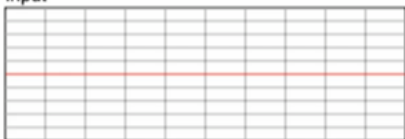


frequency: f = 1.6 [Hz]

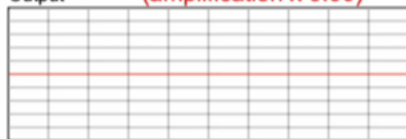


START

Input



Output (amplification x 0.00)



地盤の地震動増幅特性 - Site amplification

地震動が表層地盤でどの程度増幅するかを計算します

Calculate a site amplification under ground motion excitation

→ 専門家の方へ

time 0.00 [s]



Layer #1: Vs = 100 [m/s]



thickness = 6 [m]



Layer #2: Vs = 100 [m/s]



thickness = 6 [m]



Layer #3: Vs = 700 [m/s]

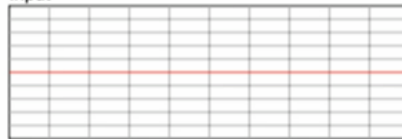


frequency: f = 1.6 [Hz]



START

Input



Output (amplification x 0.00)



地盤の震動特性と応答

以下で実際に試してみることができます
<http://www.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/~goto/contents/>

- 短い周期の波が入射する場合

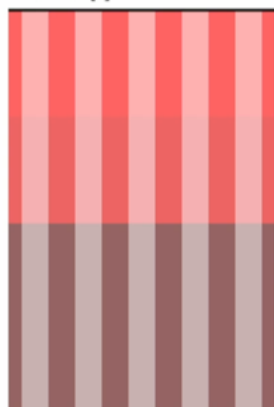
地盤の地震動増幅特性 - Site amplification

地震動が表層地盤でどの程度増幅するかを計算します

Calculate a site amplification under ground motion excitation

→ [専門家の方へ](#)

time 0.00 [s]



START

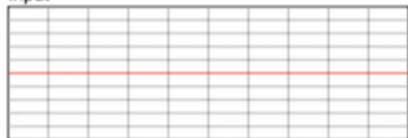
Layer #1: Vs = 100 [m/s] thickness = 4 [m]

Layer #2: Vs = 200 [m/s] thickness = 4 [m]

Layer #3: Vs = 700 [m/s]

frequency: f = 3.2 [Hz]

Input



Output (amplification x 0.00)



地盤の地震動増幅特性 - Site amplification

地震動が表層地盤でどの程度増幅するかを計算します

Calculate a site amplification under ground motion excitation

→ [専門家の方へ](#)

time 0.00 [s]



START

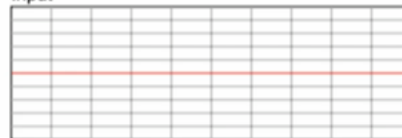
Layer #1: Vs = 100 [m/s] thickness = 6 [m]

Layer #2: Vs = 100 [m/s] thickness = 6 [m]

Layer #3: Vs = 700 [m/s]

frequency: f = 3.2 [Hz]

Input

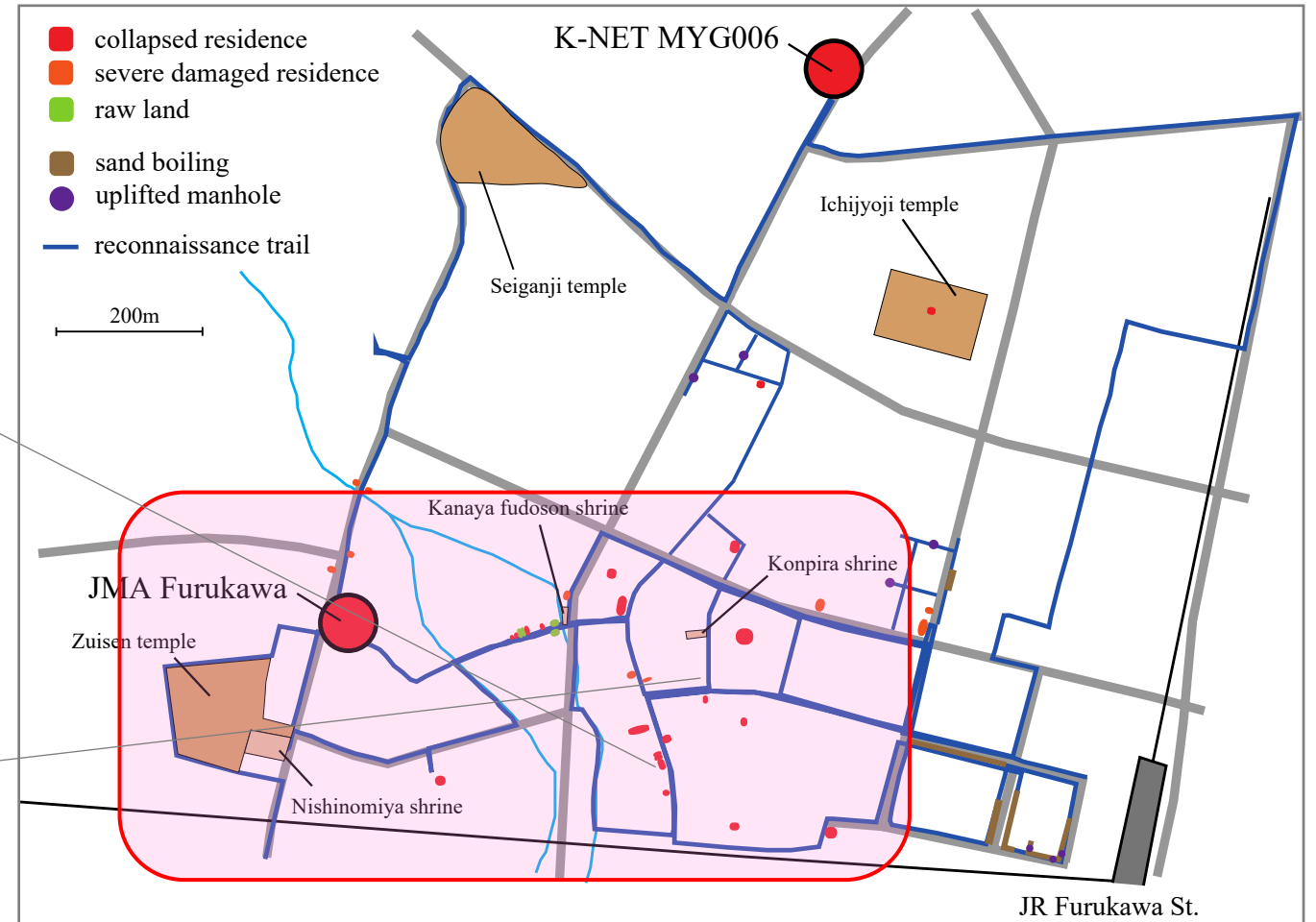


Output (amplification x 0.00)



過去の事例 <2011年東北地方太平洋沖地震における大崎市古川地区の被害>

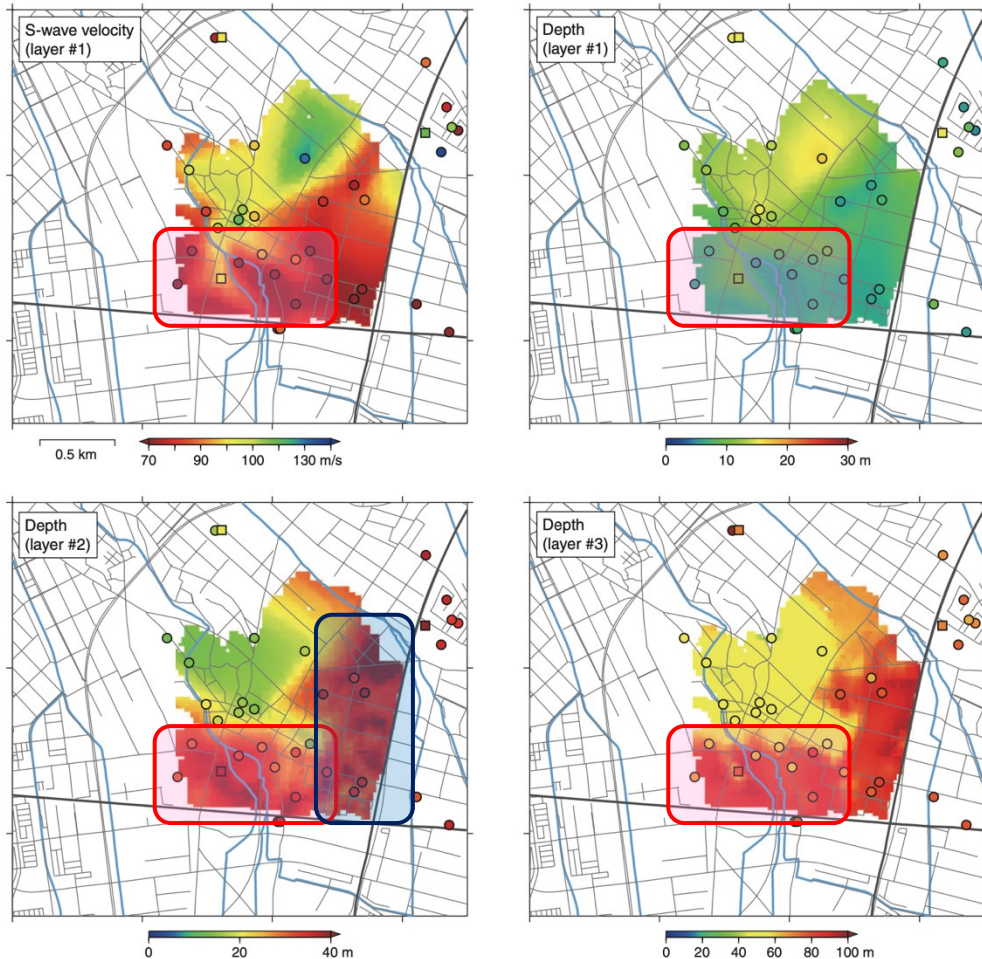
- 宮城県大崎市古川地区では、2011年東北地方太平洋沖地震において**甚大な被害が局所的に発生した。**



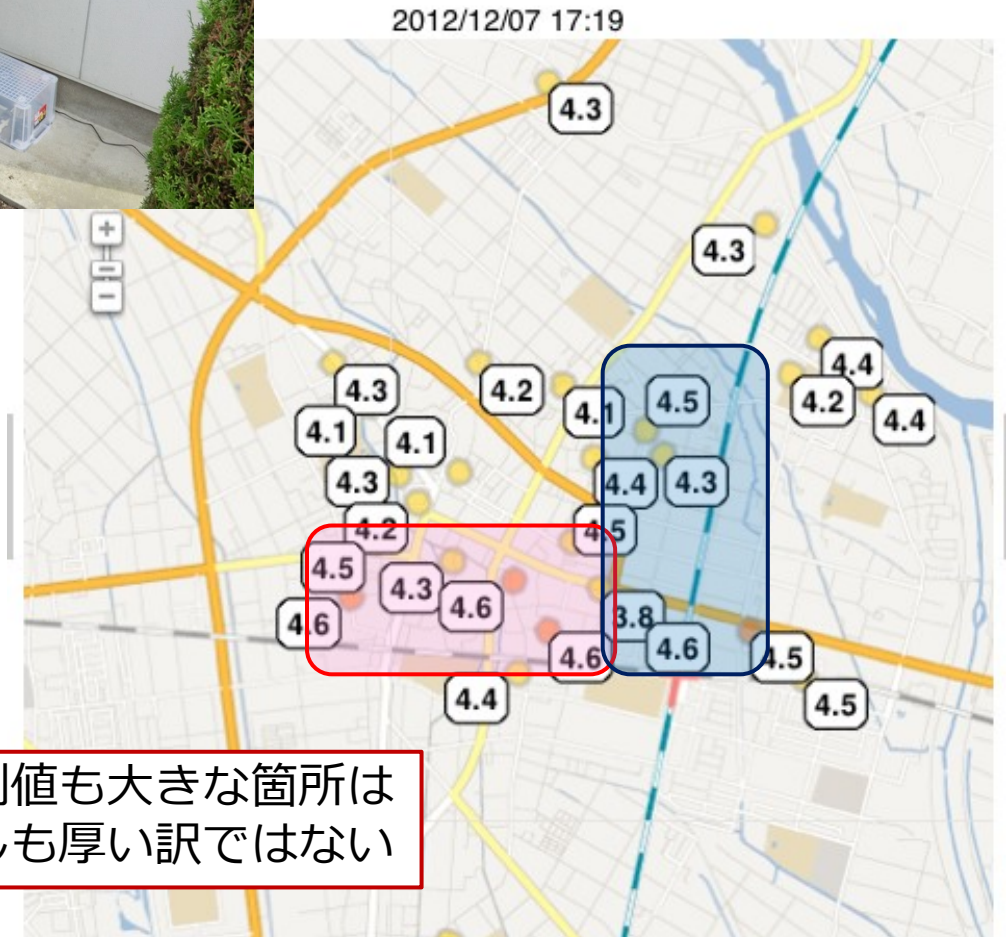
Hiroyuki Goto and Hitoshi Morikawa (2012) Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations* **52**(5), 769-779.

過去の事例 <2011年東北地方太平洋沖地震における大崎市古川地区の被害>

表層地盤モデル



Furukawa Seismometer Network (FuSeN)



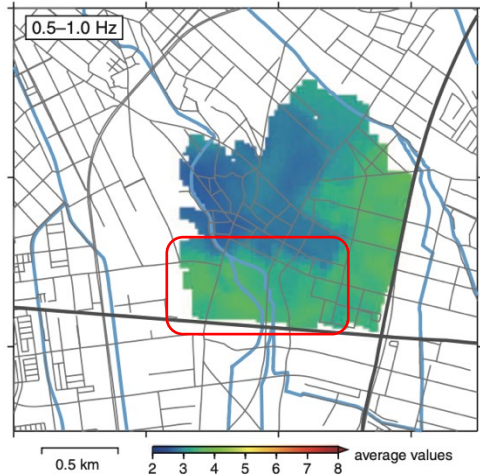
被害が大きく実測値も大きな箇所は表層地盤が必ずしも厚い訳ではない

Hiroyuki Goto, Hitoshi Mitsunaga, Masayuki Inatani, Kahori Iiyama, Koji Hada, Takaaki Ikeda, Toshiyasu Takaya, Sayaka Kimura, Ryohei Akiyama, Sumio Sawada, and Hitoshi Morikawa(2017) Shallow subsurface structure estimated from dense aftershock records and microtremor observation in Furukawa district, Miyagi, Japan, Exploration Geophysics **48**(1), 16-27.

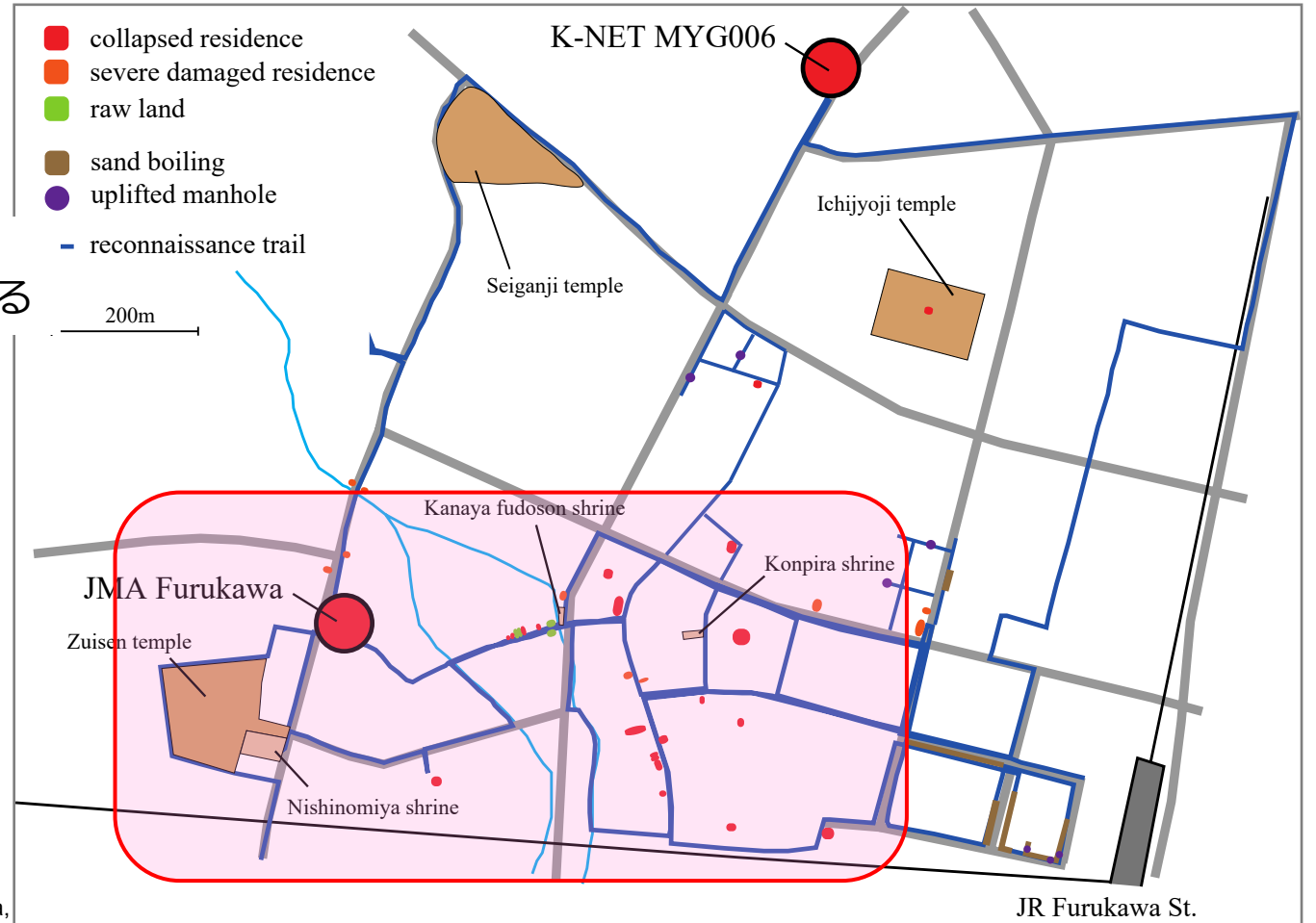
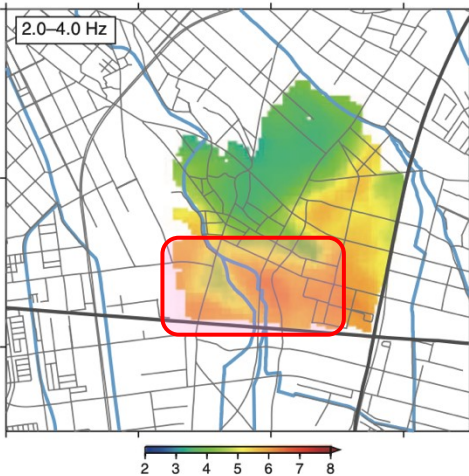
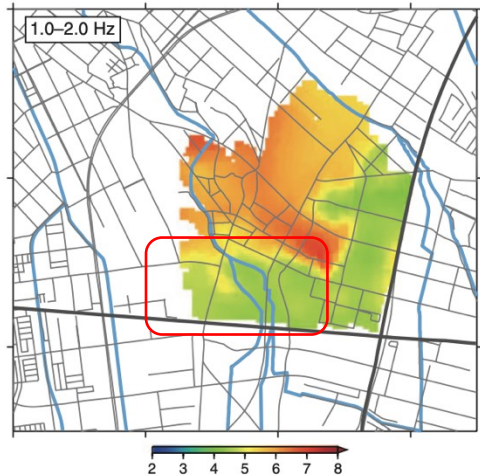
Hiroyuki Goto, Hitoshi Morikawa, Masayuki Inatani, Yumiko Ogura, Satoshi Tokue, Xin-Rui Zhang, Masahiro Iwasaki, Masayuki Araki, Sumio Sawada and Aspasia Zerva (2012) Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, Seismological Research Letters **83**(5), 765-774.

過去の事例

<2011年東北地方太平洋沖地震における大崎市古川地区の被害>



周波数毎の平均増幅度
2-4Hzの増幅度がよく対応する



Hiroyuki Goto, Hitoshi Mitsunaga, Masayuki Inatani, Kahori Iiyama, Koji Hada, Takaaki Ikeda, Toshiyasu Takaya, Sayaka Kimura, Ryohei Akiyama, Sumio Sawada, and Hitoshi Morikawa(2017) Shallow subsurface structure estimated from dense aftershock records and microtremor observation in Furukawa district, Miyagi, Japan, Exploration Geophysics **48**(1), 16-27.

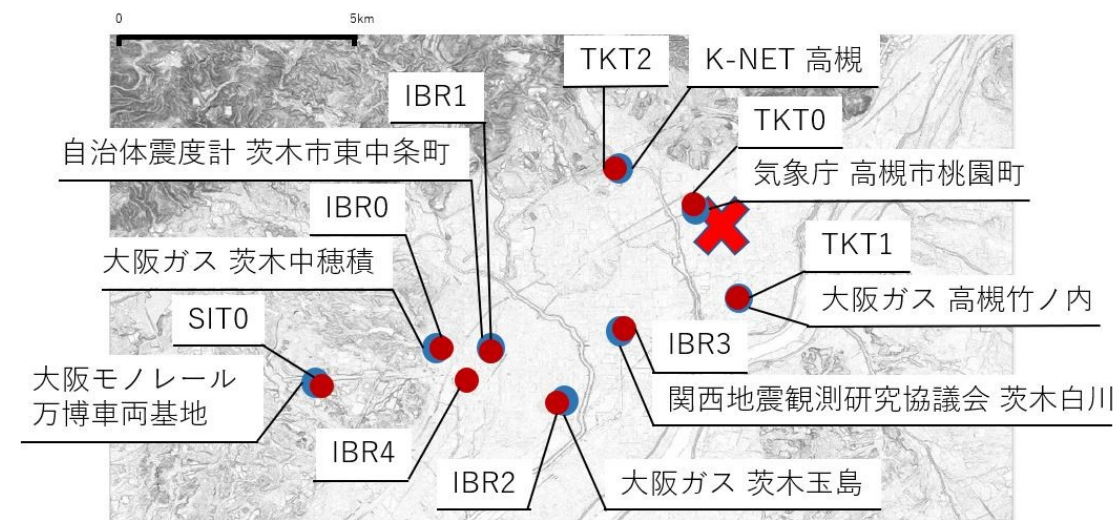
被害分布を説明するために

表層地盤の影響（地盤震動特性）を取り除いて工学的基盤波を推定したい

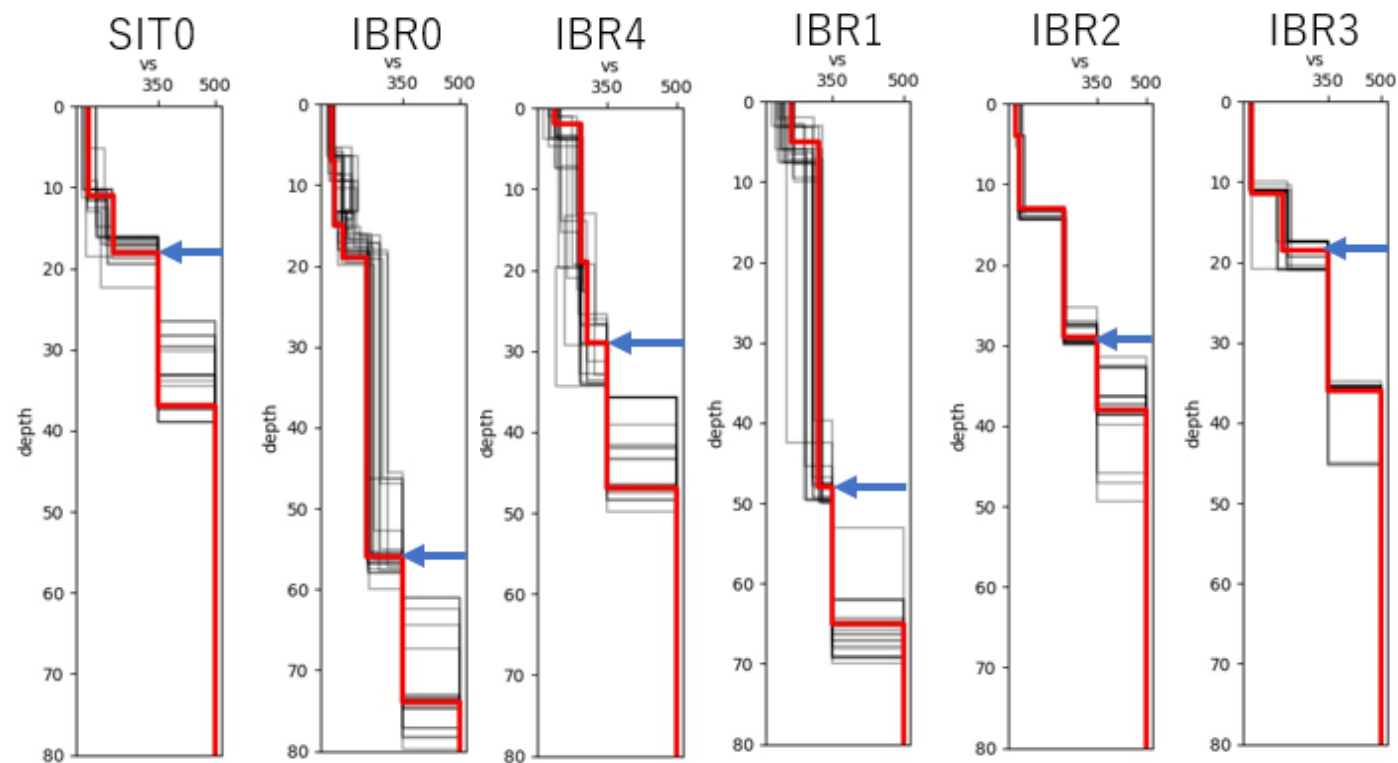
- 地震記録の得られている箇所の構造を決める
 - 地震記録を工学的基盤に引き戻す



常時微動アレイ探査



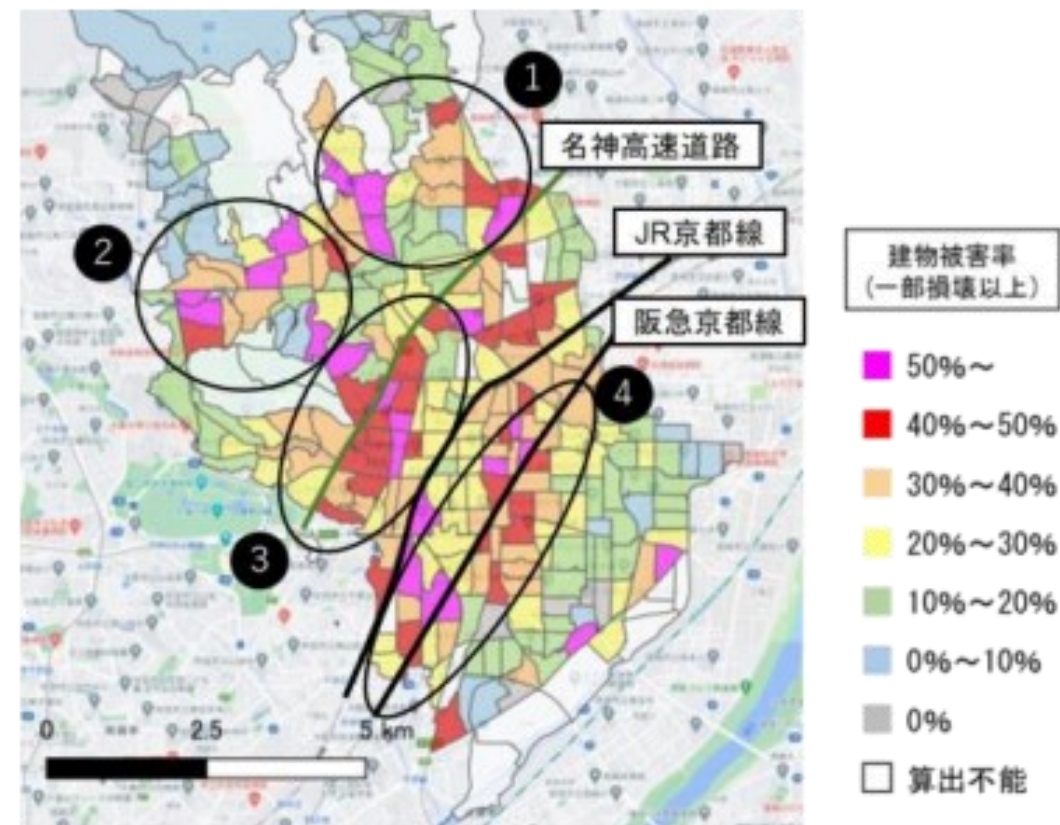
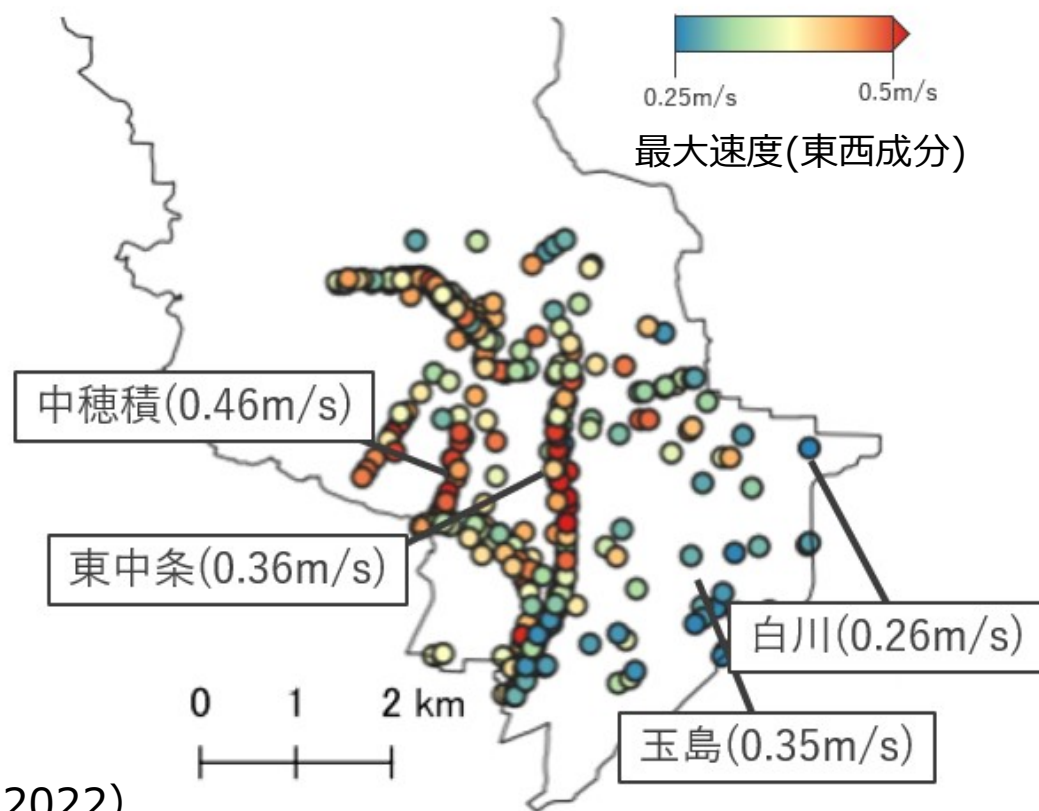
● : 地震観測点 X : 震源 ● : 常時微動アレイ観測点



(後藤他, 2022)

茨木市内の地震動の推定

- 工学的基盤波を空間補間し，ボーリング地点の地表地震動を計算（等価線形解析）
- 全体的な傾向は被害率分布と調和的に

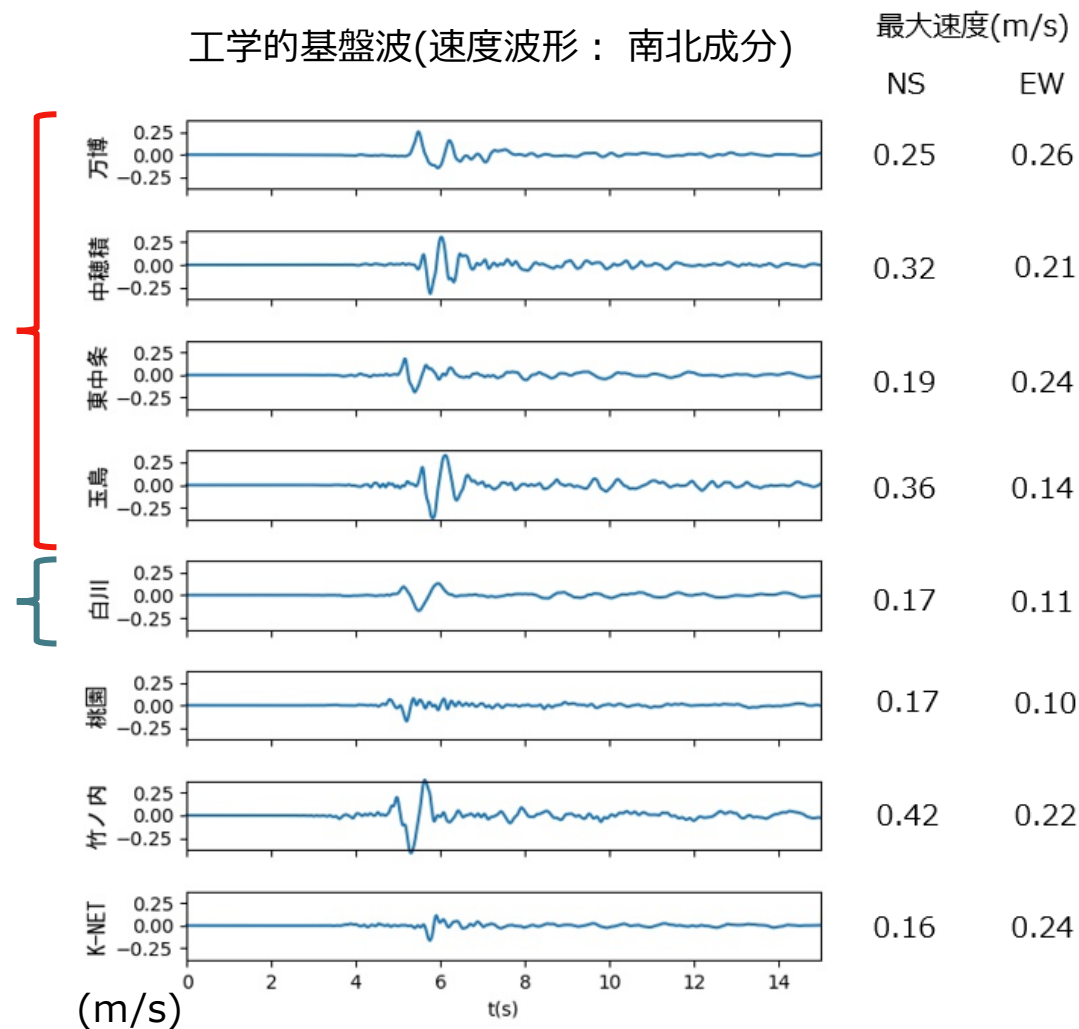
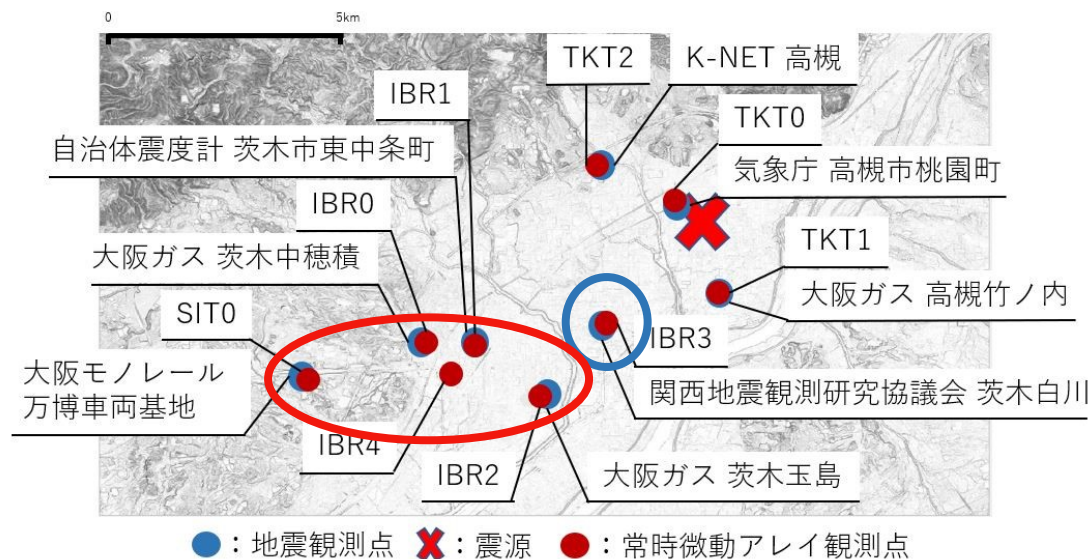


工学的基盤波

- 工学的基盤波の最大速度は白川と比べて、**万博や中穂積，東中条，玉島**の方が大きい

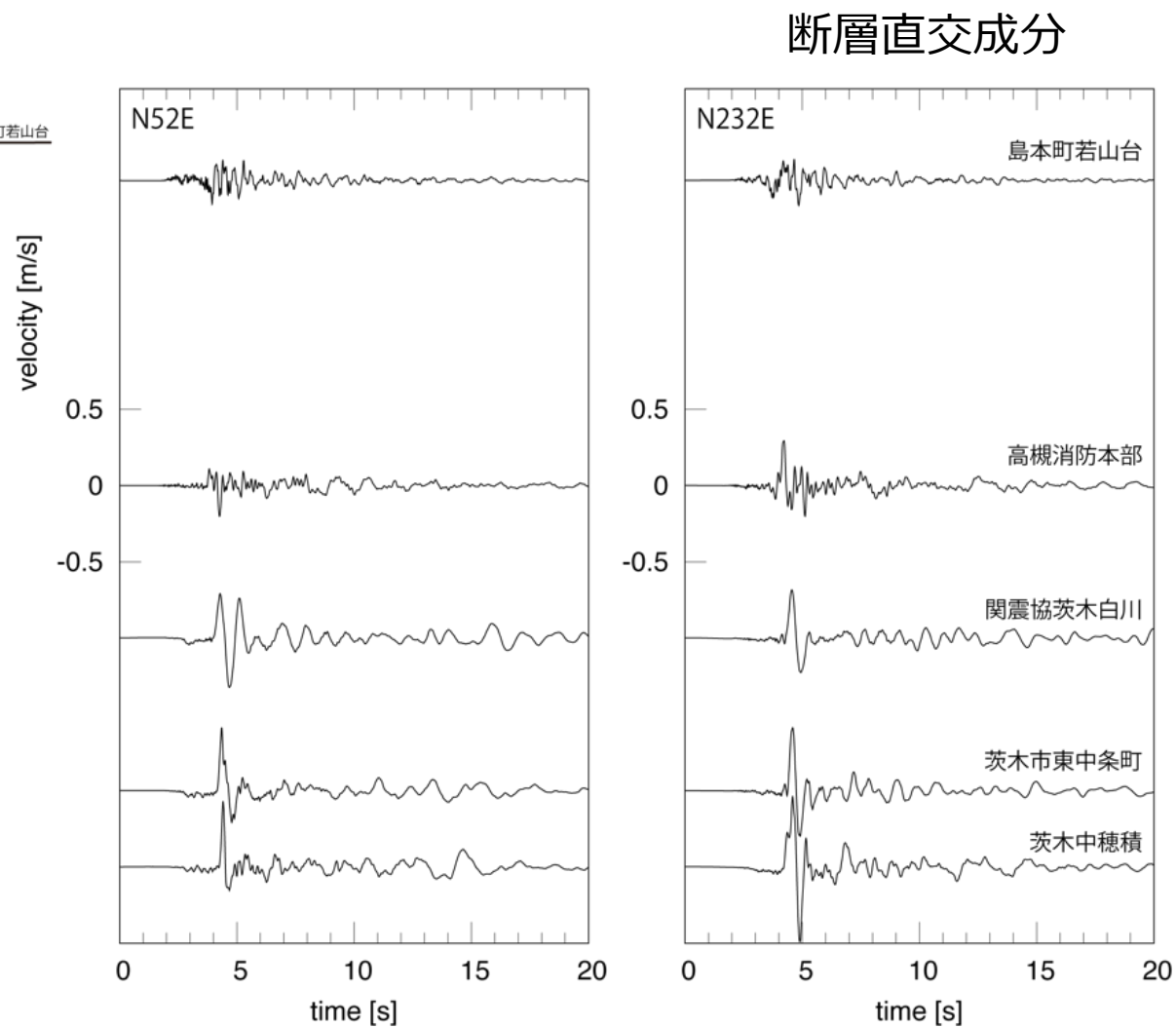
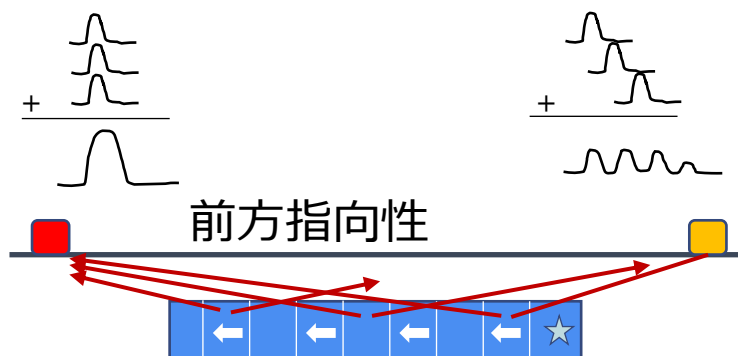
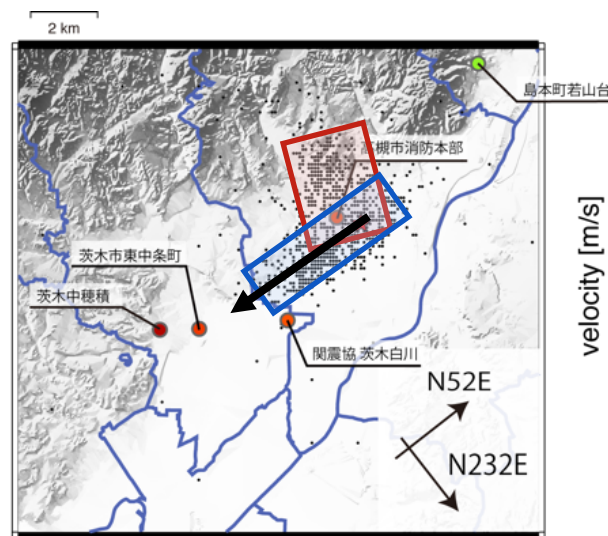
(後藤他, 2022)

⇒ 震源特性あるいは深部構造の影響？



断層破壊による前方指向性による影響

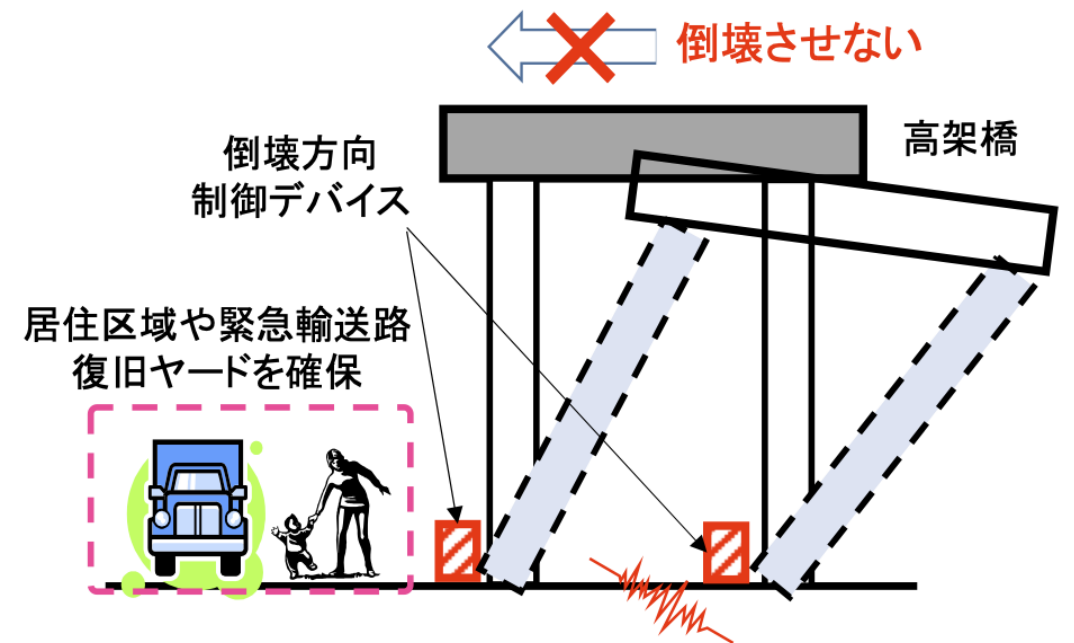
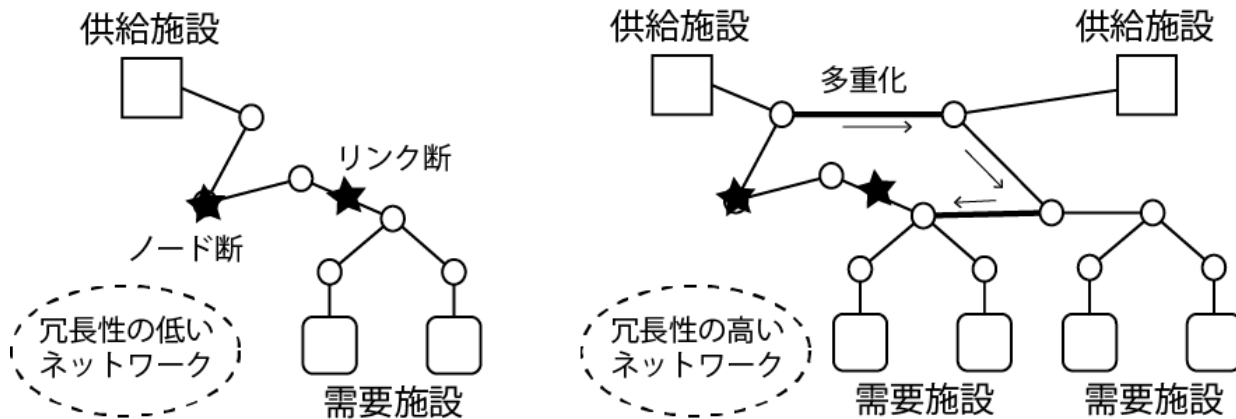
- 茨木市側では断層直交成分に明瞭なパルスが確認できる
- 震源断層の影響も無視できない



想定外への考え方 危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする

危機耐性 (本田他, 2016)

狭義の設計段階で想定していなかった事象においても、
構造物が、単体またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないような性質



(豊岡他, 2019)

まとめ

- 2018年大阪府北部の地震は、茨木市と高槻市において一部損壊家屋が多く見られた
- 震源近傍の地震記録が利用可能であり、震源直上の高槻市だけでなく茨木市の観測値も大きい
- 罹災証明書による建物被害率は、Vs30の分布と対応しない
- 高度経済成長期に形成された地域は被害率が高いが、その後に更新が進んだ地域は被害が少ない
- Vs30の低い粘性土質の地域より、表層が砂質土の地域の方が被害が多い
- 余震観測によって、砂質土の地域は周波数特性が異なる（3-4Hzが卓越）ことが示された
- 常時微動によって表層地盤をモデル化し工学的基盤波を推定した。これを用いて推定した地表地震動分布は、被害率分布を概ね説明できる。
- 被害分布は、震源特性（前方指向性）、サイト特性、および街の形成過程の全てが複雑に影響した結果であり、これらをうまく分離して評価することが重要である
- **大阪府北部の地震は、都市部で発生する将来の地震被害予測における貴重な資料である。**