震度観測体制の年代差・地域差を考慮した震度情報の解釈

名古屋大学大学院環境学研究科　都市環境学専攻
福和研究室　博士課程前期課程 2 年　杉山充樹

1. はじめに

地震による揺れの強さについて，気象庁は震度と長周期地震動階級を発表している．1996 年 4 月以降，震度は建物被害や揺れの感じ方とほぼ対応するように設計された計測震度で定められている．計測震度は揺れの強さ，周期，継続時間などの地震被害に関わる情報を単一の指標で表すことができ，地震情報の迅速かつ簡便な伝達に有効である．日本で地震後に即時公開されるのは震度のみであり，震度は地震発生時に国民が状況を判断するための重要な情報である．

気象庁が発表する震度は震度計のある地点での観測値で本来は点の情報であるが，地域を代表する面の情報として使われることがある．震度情報が有効に活用されるためには，観測震度が地域の揺れを適切に代表している必要がある．兵庫県南部地震以降，震度観測点が急増し，震度観測点密度が高くなった．昔に比べ震央に近い揺れを観測できるため，観測最大震度が大きくなるが，その程度については定量的に評価されていない．

本論では，観測震度の時代による変化と地域差を定量的に示すことを目的とする．現在の地震災害対応が各地域の観測最大震度を基準としているため，震度観測体制の年代差・地域差による観測最大震度の変化を把握しておくことは，最大震度と被害の関係を考える上での基礎資料ともなる．また，観測体制，距離減衰特性，地盤増幅特性を震度の説明変数とし，震度の説明変数と感度の関係を分析し，震度情報の適切な利用につながる知見を示すことを目的とする．

2. 震度観測の変遷

図 1 に気象庁による震度の発表に用いられる震度観測点数の推移を示す．1980 年代後半から 1990 年代前半までの観測点数は 200 ヶ所程度で大きな変化はないが，1994 年に倍増し，兵庫県南部地震を受けて，1996 年以降観測点数が急激に増加した．2021 年 2 月現在，気象庁 671 ヶ所，防災科学技術研究所 793 ヶ所，地方公共団体 2911 ヶ所，合計 4375 ヶ所の観測点での震度を発表している．

3. 震度観測体制の年代差・地域差の定量評価

3.1 観測事例にみる震度観測体制と観測最大震度

図 2 に大阪府北部の地震と兵庫県南部地震の大阪府周辺の震度分布図 [1]を示す．1995 年と 2018 年では，大阪府の震度観測点は 1 ヶ所から 88 ヶ所に増加している．兵庫県南部地震当時，大阪府の震度観測点は大阪中央区大手前のみであり，大手前では両地震共に震度 4 を記録した．大阪府北部の地震は最大震度 6 弱を記録したが，兵庫県南部地震当時の震度観測体制であれば最大震度は 4 となり，観測最大震度には年代差がある．

3.2 震度観測体制の年代差と観測最大震度

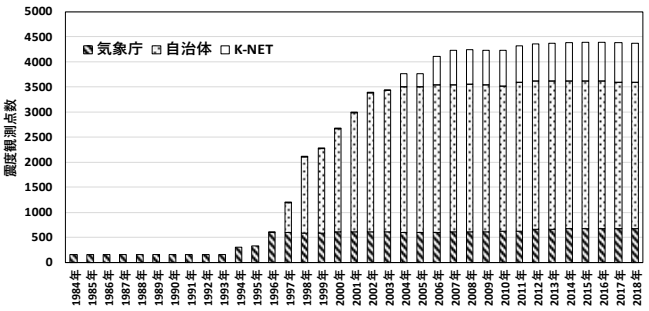

図 1　震度発表に用いられる震度観測点数の推移

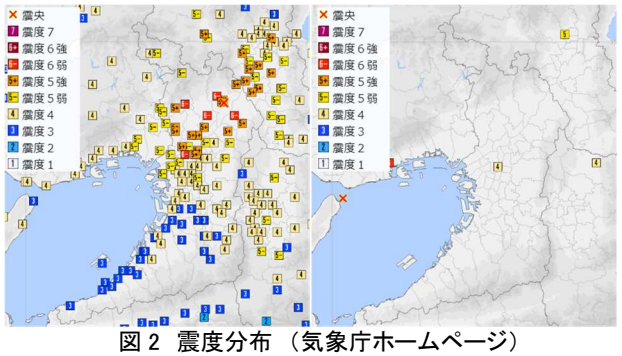

図 2　震度分布 （気象庁ホームページ）
大阪府北部の地震（左）兵庫県南部地震（右）

図 3 に震央が陸域の地震について，気象庁の地震カタログの震度データを使用し，年ごとの観測最大震度の平均と標準偏差，地震発生回数を示す．震度観測点が増加した 1996 年以降，観測最大震度が 1 程度大きくなっている．マグニチュード 4 以上 5 未満の地震について，1995 年以前の観測最大震度の平均は 2.1，1996 年以降の平均は 2.9 である．なお，東北地方太平洋沖地震が発生した 2011 年や，余震が多かった新潟県中越地震や熊本地震の 2004 年と 2016 年で地震回数が増加しているが，ほかの年では地震発生回数の大きな変化はない．

図 4 に，マグニチュード 4 以上の震央が陸域の地震について，最大震度を記録した観測点の震央距離帯別度数分布を 5 年ごとの期間に分けて示す．1995 年以前は震央距離 50 km 以下の観測記録が少ない．1990 年以前については，震央距離 20 km 以下の記録はほとんどなく，1996 年以降，震央距離が 20 km 以下の記録が増加した．ボロノイ図を利用し，ボロノイ領域と同じ面積の円の半径から震度観測点の支配領域の平均半径を求めると，1991-1995 年は約 25 km，2011-2015 年では約 5 km となった．震度観測点密度が高くなり，震央距離の短い観測記録が増加したことで観測最大震度が大きくなった．

3.2 震度観測体制の地域差と観測最大震度

図 5 に東京都，大阪府，愛知県周辺の震度観測点を基準にボロノイ分割した地図を示す．ボロノイ領域を人口で色分けし震度観測点を地盤増幅度で色分けした．図 6 に

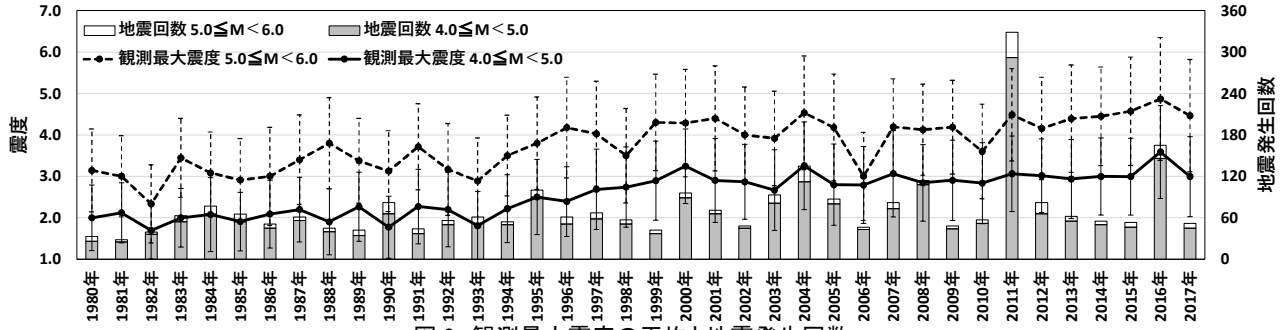

図 3 観測最大震度の平均と地震発生回数

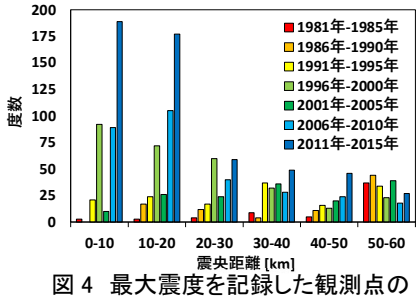

図 4 最大震度を記録した観測点の震央距離帯別度数分布（M4 以上）

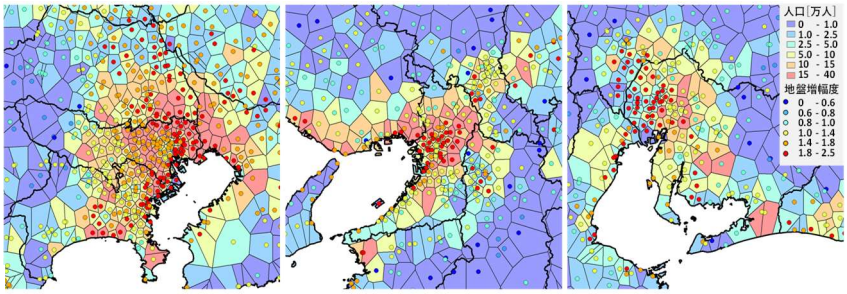

図 5 震度観測点でボロノイ分割した地図（東京都，大阪府，愛知県）

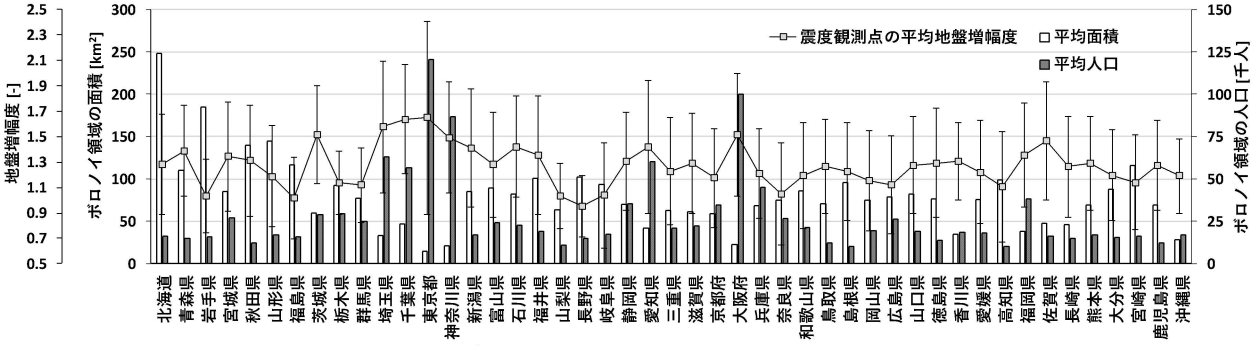

図 6 震度観測点のボロノイ領域の平均面積と平均人口，平均地盤増幅度

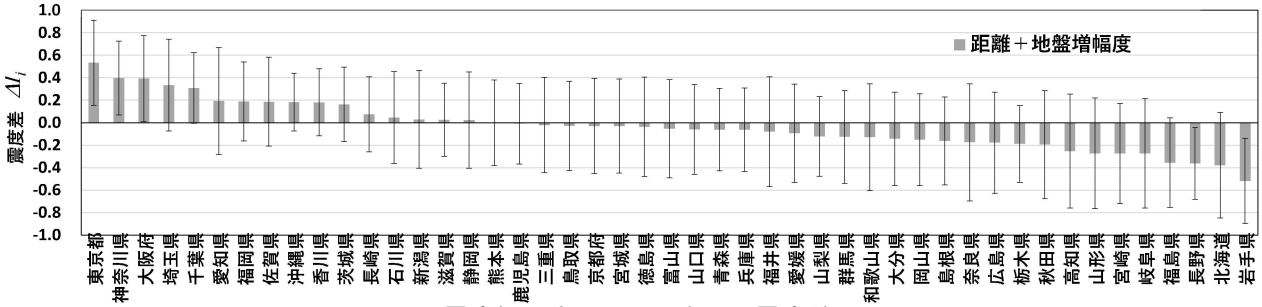

図 7 震度観測点配置から求めた震度差 ΔI_i

都道府県ごとのボロノイ領域の面積とボロノイ領域に含まれる人口，震度観測点の地盤増幅度の平均を示す．人口集積地帯には震度観測点が集中しており，震度観測点当たりの面積は小さく地盤増幅度が大きい．また，東京都，神奈川県，大阪府といった都市部ほど震度観測点当たりの人口が多く，面積は小さい．

同じ規模の地震が直下で発生した際に，ある県の震度観測点配置から得られる観測最大震度と全国の平均的な震度観測点配置から得られる観測最大震度の差（以下震度差）を概算した．実体波の振幅が震源距離に反比例することと地震動の振幅が地盤増幅度に比例することを考慮し，振幅の差を震度と最大加速度の関係式 [2]により震度の差に変換した．震度観測点のカバーするボロノイ領域の半径の平均値によって震源距離を代用した．震度差は，都道府県単位の震度観測点配置の特徴を表す指標と考えることができる．図 7 に，各都道府県の震度観測点配置から求めた震度差 ΔI_i を示す．東京都，神奈川県，大阪府では，震度差 ΔI_i が特に大きく，観測最大震度が大きくなりやすいことがわかる．都道府県単位の傾向としては，震度差 ΔI_i がほとんど 0 である宮城県や富山県でも，標準偏差を考慮すると，震度観測点によっては震度差 ΔI_i が大きい．

気象庁の震度情報には，防災目的で配置される自治体の震度観測網と面積を配置基準とする K-NET が含まれている．震度観測点に占める自治体震度計の割合が大きい

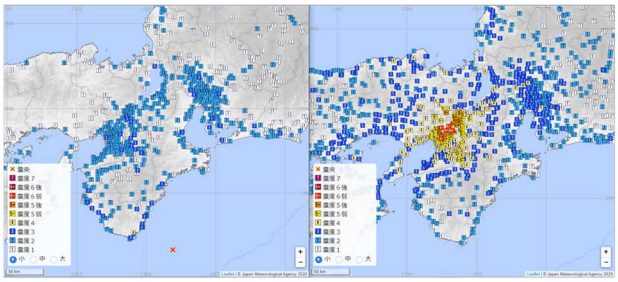

図 8 震度分布
三重県南東沖の地震（左） 大阪府北部の地震（右）

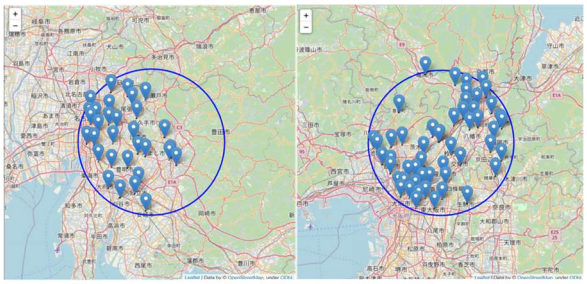

図 9 推計地点の分布
三重県南東沖の地震（左） 大阪府北部の地震（右）

ため，震度観測体制全体としては，人口の多い地域へ震度観測点が集中する．震度の地震防災での利用を考えると，特定の地域への震度観測点の集中は避けられないため，震度観測点配置は均等にならず，震度観測体制の地域差が観測最大震度の違いの原因となる．

4. 震度の説明変数と感度の関係

4.1 距離減衰と地盤増幅を考慮した震度の補間

距離減衰特性と地盤増幅特性を考慮した地震動波形の振幅の補正によって推計震度を求め，震度の説明変数と感度の関係を把握する．推計震度 I_e は次式で定義する．

$$Ie = Io + 2\log(R_o/R_e) + 2\log(S_e/S_o) \quad (1)$$

ここで，Io は参照観測点の観測震度，R_o は参照観測点の震源距離，R_e は推計地点の震源距離，S_o は参照観測点の地盤増幅度，S_e は推計地点の地盤増幅度である．地盤増幅度は J-SHIS の 250 m メッシュデータ [3]を観測点に割り当てた．推計地点を除いた観測点を用いてドロネー図を作成し，推計地点が含まれる三角形領域を構成する頂点を参照観測点とした．実体波の振幅の距離減衰を震源距離の比，表層地盤増幅を地盤増幅度の比で考慮している．

地盤増幅補正の効果をみるために 2016 年三重県南東沖の地震，距離減衰補正の効果をみるために 2018 年大阪府北部の地震について検討を行った．2016 年三重県南東沖の地震は気象庁マグニチュード 6.5，観測最大震度 4 の地震である．2018 年大阪府北部の地震（M_w=5.6, M_j=6.1），観測最大震度 6 弱の地震である．図 8 に両地震の震度分布 [1]を示す．図 9 に推計地点の分布を示す．

図 10 に 2016 年三重県南東沖の地震について観測震度と推計震度の比較を示す．愛知県東部（東経 137.093，西経 35.125）を中心とした半径 20 km の円に含まれる観測点 31 点を対象とした．この地域は平野部に比べて地形の変化が大きい．震央距離が 200 km 程度で観測点間の震源距離の比が小さく，距離補正の影響が小さい．補正なしは周辺観測点の観測震度を観測点間距離の逆数で重みづけ平均した値である．距離補正，地盤増幅補正をした結果と補正なしともにばらつきが大きい．図 11 に観測震度と推計震度の差の絶対値の割合のヒストグラムを示す．8 割以上の推計地点において震度階級に違いは無いが，距離補正，地盤増幅補正をした方が観測震度と推計震度の差が大きくなっている．

名古屋市のボーリングデータが得られる観測点 24 点について，J-SHIS の地盤増幅度とボーリングデータから算出した地盤増幅度を用いた推計震度を比較した．図 12 に観測震度と推計震度の比較を示す．相関係数はボーリングデータでは 0.71，J-SHIS の地盤増幅度では 0.51 である．ボーリングデータを使用した場合の方が相関はよいが観測点によっては推計震度と観測震度の差が大きくなっている．使用する地盤データの性質により推計の精度が異なる．

ここで使用した J-SHIS の地盤増幅度は全国を概観する目的で作成されたデータであり，観測点に割り当てて使用することを前提としたデータではない．また，推計地点と参照地点でばらつきのあるデータ同士の比較をしており，2 点間の地盤増幅度の比による地盤増幅の評価は難しかった．地盤増幅は地震波の周期と地盤の伝達関数のピークから決まり，平均的な地盤増幅の効果よりも，周波数特性による影響が大きい場合は推計値と観測記録の差が大きくなる．複数地点について推計震度と観測震度を比較することでばらつきの影響を小さくすることを試みたが，地盤増幅度による簡易的な評価には限界がある．

図 13 に 2018 年大阪府北部の地震について観測震度と推計震度の比較を示す．震央（東経 135.622，西経 34.843）を中心とした半径 20 km の円に含まれる観測点 52 点を対象とした．この地域は平野に配置される観測点を多く含む．三重県南東沖の地震と比較して相関係数が大きいが，計測震度は主に振幅の対数から定義されるため，震度が大きいほど振幅の差に対する計測震度の値の変化が小さくなる影響が含まれている．図 14 に観測震度と推計震度の差の絶対値の割合のヒストグラムを示す．三重県南東沖の地震と同様に，距離補正，地盤増幅補正をした方が観測震度と推計震度の差が大きくなっている．

震源近傍では，断層最短距離と震源距離の比が大きく，距離の定義により距離減衰補正が異なる．図 15 に距離補正を断層最短距離の比，距離減衰式 [4]の比によって考慮した場合の観測震度と推計震度の比較を示す．数値に違いはあるがグラフからは違いが確認できない．また，図 13 補正ありとの違いも小さい．震央距離 10 km 以内の地点では，断層最短距離と震源距離による距離補正での振幅の違いは計測震度に換算した値で 0.1~0.3 程度あるが，震央距離 10 km 以内には観測点がほとんどなく，断層面の考慮の有無による推計精度の違いは確認できなかった．

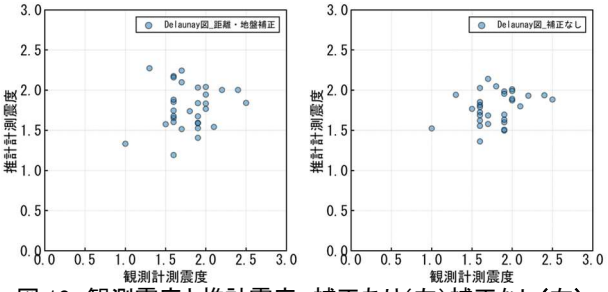

図 10　観測震度と推計震度　補正あり(左)補正なし(右)

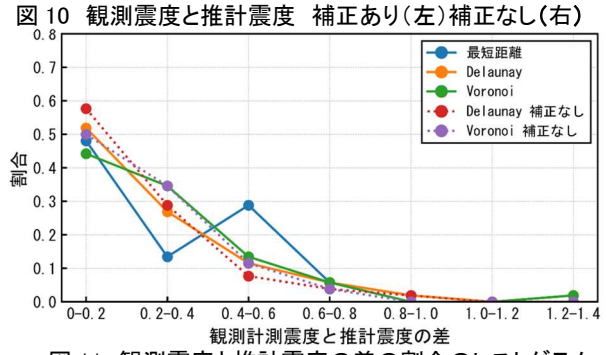

図 11　観測震度と推計震度の差の割合のヒストグラム

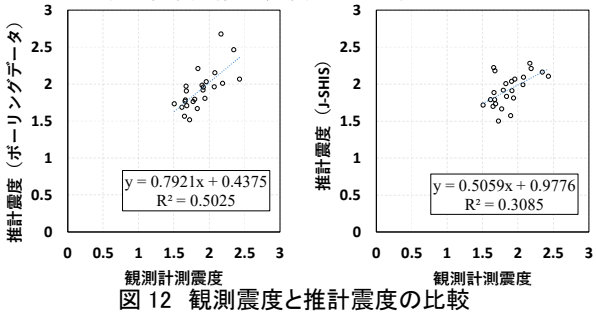

図 12　観測震度と推計震度の比較
ボーリングデータ(左)　J-SHIS(右)

震源近傍では，観測点間距離と震源距離は 10 km 程度でおおよそ同じ大きさである．震源近傍の観測点間での距離減衰特性の違いを適切に評価するためには，震源距離に比して観測点間距離が大きい．また，震度には距離減衰の効果だけでなく，地盤増幅の効果も含まれ，距離減衰特性を正しく評価するためには地盤増幅特性の評価も必要になる．

5. 結論

兵庫県南部地震以降，我が国の震度観測点は大きく増加した．気象庁地震カタログの震度データや全国を震度観測点を基準にボロノイ分割した領域ごとの分析を行った．観測最大震度の年代差について，震度観測点の高密度化に伴い観測最大震度が増大したこと，1996 年以降，同程度の規模の内陸浅部で発生する地震では，観測最大震度が 1 程度大きくなっていることを示した．観測最大震度の地域差について，人口密度の大きな東京都，神奈川県，大阪府等の都府県は，震度観測点が密で地盤が軟弱で，同程度の規模の地震に対する観測最大震度が全国平均よりも大きくなりやすい傾向があること，同じ規模の地震が直下で発生した際には，本論で定義した震度差の値にして 0.5 程度の違いがあることを示した．

推計震度を定義し震度の補間を検討したが，周波数特性の影響などを理由に，震源距離の比と地盤増幅度の比

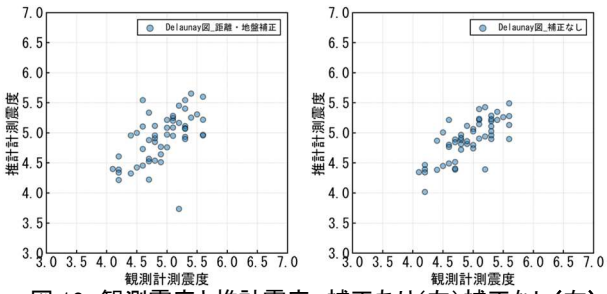

図 13　観測震度と推計震度　補正あり(左)補正なし(右)

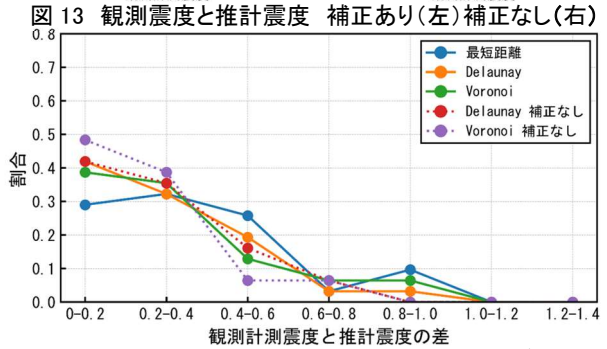

図 14　観測震度と推計震度の差の割合のヒストグラム

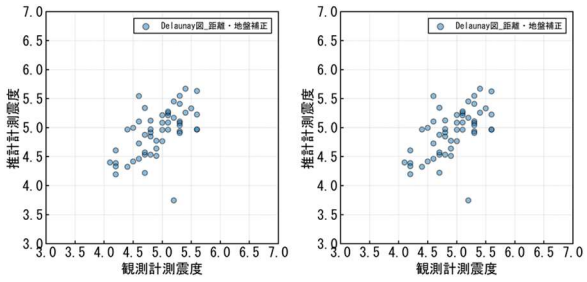

図 15　観測震度と推計震度の比較
断層最短距離(左)　距離減衰式(右)

による震度の補正効果に有効性は確認できなかった．現在の震度観測点密度は震源近傍での距離減衰特性の把握に十分ではない．また，地盤データの制約から周波数特性を考慮した地盤増幅特性の評価をすべての震度観測点について適用することはできず，震度の説明変数と感度の関係の把握には限界がある．

計測震度は地震動波形の振幅の最大値や継続時間，卓越周期などを考慮しつつ，体感震度と対応するように定義され，解像度を落とした指標である．震度は物理量ではなく，ほかの地震動強さ指標との関係から解釈する必要があるが，ばらつきが大きい．

また，丘陵地では震度に影響する表層の地形変化は微視的なものである．局所的な強い揺れや現在の震度観測体制からは得ることのできない詳細な地震動分布を把握するためには，地震観測点のさらなる増強が必要である．

参考文献
1)気象庁：震度データベース検索,
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html#20160401113907 (参照 2021-02-06).
2)河角廣：震度と震度階，地震第 1 輯, Vol. 15, pp. 6-12, 1943.
3)防災科学技術研究所：地形・地盤分類 250m メッシュマップ,
https://doi.org/10.17598/nied.0011.
4) 司宏俊・翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，523, 63-70, 1999.