

近年の被害地震における表層地盤のAVS30と震度分布評価に関する一検討

末富 岩雄¹・塚本 博之¹・福島 康宏¹・尾茂 淳平¹・大保 直人²

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発 災害リスク研究センター 地震防災グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp, tsukamoto-hi@ej-hds.co.jp, fukushima-ya@ej-hds.co.jp

²正会員 (公財) 地震予知総合研究振興会 地震防災調査研究部
(〒101-0064 東京都千代田区猿楽町1-5-18)

E-mail: ohbo@8f.adep.or.jp

地震動分布推定等で地震ハザードステーションの地形分類が用いられることが多いが、この地形分類では人工改変は考慮されず、またAVS30は全国の平均的な関係式から推定している。本研究では、推定人工平坦化地を考慮した上で、ボーリングデータと統合したAVS30のデータを構築し、近年の国内の代表的な被害地震における震度分布を距離減衰式をトレンドとするクリギング法により算定した。地域により造成地の時期や規模が異なるので、推定人工平坦化地の抽出状況も異なったが、大都市部においては概ね整合し、より適切と考えられる震度分布が得られた。

Key Words : average shear-wave velocity, geomorphological land classification, artificially flattened land, map of JMA seismic intensity scale

1. はじめに

災害初動時に対応方針を決定する判断支援として、気象庁や(国研)防災科学技術研究所(以下、防災科研)から早期に震度分布が公表されている¹⁾²⁾。一方で、交通やライフラインのように面的に広がる施設の被害と地震動の大きさの関係(被害推定式)を検討するためには、震源断面との位置関係や表層地盤の増幅を考慮した、より精度の高い地震動分布が必要となる。2011年東日本大震災及び2016年熊本地震については、国土技術政策総合研究所により多くの観測記録を用いた最大地動分布が算定され公開されている³⁾が、これも地盤情報は文献¹⁾²⁾と同様に、地震ハザードステーション(J-SHIS)⁴⁾の250mメッシュ地形分類およびAVS30(深さ30mまでの平均S波速度)のデータである。著者らは、これまで近年の国内の主要な被害地震について、様々な機関による観測データやボーリング情報を用いた地盤情報の高度化を行って、最大地動分布の推定を行って各種の検討に活用してきた⁵⁾⁶⁾⁷⁾。その際に、J-SHISの250mメッシュ地形分類およびAVS30のデータを基礎データとしていたが、若松ら⁸⁾の地形分類では、人工改変を考慮していないのに対し、実際の地下埋設管の被害は盛土切土の行われた人工改変地盤で生じることが多い。そこで、塚本ら(2014)⁹⁾は国土数値情報の土地利用細分メッシュを加味することで、人工平坦化地を推定する方法を提案している。

本研究では、これまでと同様にボーリングデータを活用することに加え、推定人工平坦化地を考慮した地震動分布推定を行う方法と効果について検討する。また、震災の帯と呼ばれる複雑な最大地動分布を再現するには地震観測点が少ないことから、これまで算定していなかった1995年兵庫県南部地震についても算定する(松岡・若松・橋本¹⁰⁾も2000年鳥取県西部地震以降を対象)。

2. 補間推定手法

(1) 地動分布推定の流れ

図-1に最大地動分布の推定フローを示す。距離減衰式をトレンド成分として、観測値との誤差を補間するクリギング(Kriging)法が、観測点が疎になる地域でも信頼性があることから広く用いられてきており、今回もこれを用いる(プログラムRasmo¹¹⁾を使用)。精度よく評価する上では、①の観測記録は当然として、②揺れやすさを表す地盤指標、③②をパラメータとする地盤増幅度、④トレンドとする距離減衰式、が重要となる(図では緑色で着色)。②については、将来的には卓越周期等のより地震動特性と関連が強い指標を用いることが考えられるが、本研究ではJ-SHISで整備されているので全国で利用可能なAVS30を用いる。

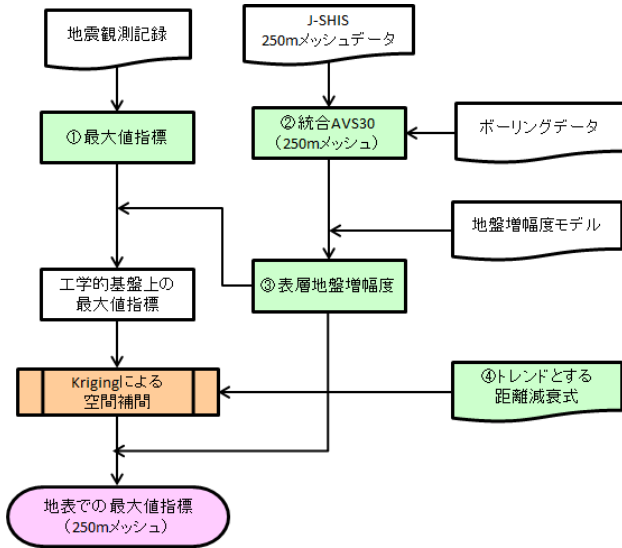


図-1 最大地動分布の推定フロー

(2) 250m メッシュの地盤情報

全国で整備され活用可能なのは，防災科研のJ-SHIS⁴⁾で公開されている250mメッシュの地形分類およびAVS30である．ただし，これは全国の平均的な地形分類に標高等を加味したAVS30との関係から算出されたものであり，地域性は考慮されていない．末富・石田ら(2007)⁵⁾の方法は，ボーリングデータを活用してJ-SHISの250mメッシュのAVS30を補正するものである．本研究でもこの方法を用いるが，末富ら⁵⁾の際は日本測地系の旧版であったので，世界測地系のJ-SHISのv3に統一して，既往成果も見直す．

式(1)のように，地形分類による項を加えた上で距離の重みにより，J-SHISの250メッシュでのAVS30とボーリングデータのAVS30を統合するものである．なお，山地・丘陵等（分類番号1～7）では，ボーリングデータが少なくAVS30が300m/sを越える硬い地盤でもあるので，地形分類のみから評価する．

$$\bar{z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} z_i + w_g z_g}{\sum_{i=1}^n w_{ij} + w_g} \quad (1)$$

ここで， $\bar{z}_j$ はj番目のメッシュの推定値， z_i はi地点のボーリングデータによるAVS30， w_{ij} は重みである． w_g は，地形分類の重みであり， z_g は地形分類によるAVS30である．

$$w_{ij} = \frac{\alpha}{r_{ij}^n}, \quad w_g = \frac{1}{r_g^n} \quad (2)$$

ここで， r_{ij} はi地点とj地点間の距離である． α は，地形分類が同じである点の重みを増すための係数であり， $n=2$ とする．

ボーリングデータからAVS30を求めるには，当然S波速度が必要となるが，PS検層データは少なく，多くの場合N値からS波速度を算出することに

なる．道路橋示方書や内閣府中央防災会議など様々な式があるが，本研究では，式(3)の田村・山崎式¹²⁾を用いる．谷底低地では軟弱な腐植土が堆積していることも多く，土質分類が多いのでそれを考慮できることや，K-NETと横浜市の強震観測点のPS検層データを用いているので，J-SHISのAVS30の作成に用いられている松岡らの関係とデータセットが重なるものが多く，J-SHISとの整合性がよいと考えられることによる．

$$V_s = 108.5 N^{0.319} \begin{pmatrix} 1.08_G \\ 0.93_S \\ 1.00_M \\ 1.00_C \\ 0.64_O \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3) 推定人工平坦化地

1978年宮城県沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震の際に仙台市では，丘陵部の造成地で多くの住宅や地下埋設管の被害が見られた¹³⁾．他の地震でも，造成地盤では宅地被害や埋設管などの被害が多く生じている．J-SHISの地形分類では，このような造成地は考慮されず，丘陵地の分類となる．被害推定に活用するには不都合であるが，J-SHIS以外に全国的に整備されているデータはないのが実状である．そこで，塚本ら⁹⁾では，国土数値情報の土地利用細分メッシュ(100m)と組み合わせて，推定人工平坦化地を抽出する方法を提案している．これは，

- 1) J-SHISの250mメッシュ地形分類で，「山地」，「丘陵地」となっている（分類番号で1～7）．
- 2) 国土数値情報・土地利用細分メッシュ(100m)で「建物用地」，「その他の用地」，「道路」となっている．

の2つの条件を満たすメッシュを推定人工平坦化地とするものである．山地・丘陵でありながら，住宅等に活用されていれば，造成地である可能性が高いことに着目したものであり，精緻な盛土分布図と大局的にはよく対応することを示している．

本研究では，この塚本らによる推定人工平坦化地を用いる．式(1)に適用するには，AVS30を設定する必要がある．地域性はボーリングデータにより補う方法であるので，ここでは単純な仮定のもとにAVS30=300m/sとして算定する．これは， $V_s=200$ m/sの盛土層が10m， $V_s=400$ m/sの支持層が20m，あるいは $V_s=160$ m/sの盛土層が5m， $V_s=300$ m/sの砂礫層が5m， $V_s=400$ m/sの支持層が20m，に相当する．

(4) 距離減衰式

Krigingにおけるトレンド成分として用いる距離減衰式としては，論文中では震度分布のみを示すが，他の最大速度やSI値等の指標も算出するので，それぞれの指標の式を算定している片岡ら¹⁴⁾の式（短

周期レベルを用いない式)を用いる (Y:地震動指標, M_w :モーメントマグニチュード, X:断層最短距離, a, b, c:回帰係数)。

$$\log_{10} Y_{ij} = a_1 M_w - bX + c_0 - \log_{10} (X + d \cdot 10^{0.5 M_w}) + c_j \quad (4)$$

距離減衰式は他にも司・翠川(1999)や森川・藤原(2013)など様々な式が提案されており, 式による差異は小さくない。しかしながら, 地震や指標によって観測値に近い式は異なり, いずれも近年の知見を反映しているので優劣は論じがたい。また観測値を補間するので, 観測点がある都市部での差異は小さくなるため, SI 値, 震度についても係数が示されていることから採用した。なお, 2011 年東北地方太平洋沖地震については, この地震の記録のみで回帰した式を用いている⁶⁾。

(5) 表層地盤の増幅度モデル

本論文で示す計測震度については, 地盤の非線形化の影響を考慮した末富ら(2016)⁷⁾を用いる。最大速度については, J-SHIS で用いている藤本・翠川(2006)の式¹⁵⁾により算定する。SI 値も増幅度は, 最大速度の増幅度を準用する。

3. 既往地震における震度分布

(1) 1995 年兵庫県南部地震

図-2(a)に推定人工平坦化地を考慮した地形分類を示す。神戸市西区や北区の住宅地が広く推定人工平坦化地となっていることが分かる。図-2(b)は J-SHIS, 図-2(c)はボーリングデータと統合した AVS30 の分布である。用いたボーリングデータは主に関西圏地盤情報の活用協議会, 神戸 JIBANKUN, による。埋立地では J-SHIS より小さくなるが, 中央区付近から西の扇状地や三角州・海岸低地では大きくなっている。西宮市から尼崎市の北部の後背湿地でも大きくなっている。

図-2(d)は図-2(b)の J-SHIS の AVS30 を用いた際の片岡らの式による震度分布, 図-2(e)は図-2(c)の統合 AVS30 を用いて同様に算出した震度分布である。AVS30 の差異ほどには震度に差異は見られず, 観測値に比べ全体に小さい (M_w は 6.9 を用いている)。図-2(f)と図-2(g)は同様に, J-SHIS および統合 AVS30 を用いて Kriging による補間推定 (相関距離 5km: 以降も同じ) を行ったものである。神戸市西区・北区の断層付近での評価は, 建物被害状況から考えるとやや過大と考えられる。一方で, 西宮市の北西部では, 人工平坦化地の考慮などを行った図-2(e)や図-2(g)の方が大きくなっており, 建物被害状況と整合する。震度 7 の観測値がないこともあり, 震災の帯の再現には至っておらず, 神戸市西区・北区でやや過大ではあるものの, 図-2(g)はおおむね 1995 年兵庫県南部地震における震度分布を表現しているかと考えられる。

(2) 2004 年新潟県中越地震

ボーリングデータや観測記録については, 「活褶曲地帯における地震被害データアーカイブス」¹⁶⁾を用いる。図-3(a)に推定人工平坦化地を考慮した地形分類を示す。抽出された箇所は広くないが, 大きな宅地被害のあった高町団地等は抽出されている。

図-3(b)に J-SHIS, 図-3(c)に統合した AVS30 を示し, 図-3(d)に J-SHIS の AVS30 を用いた補間推定震度分布, 図-3(e)に統合 AVS30 を用いた補間推定震度分布を示す。末富ら⁵⁾から若干計算条件を変えた程度であるので, 大きな差異はない。

(3) 2007 年新潟県中越沖地震

このエリアでは推定人工平坦化地は検出されなかった。実際には, 地震時に柏崎市や西山町で造成地における地盤災害が見られたが, 規模が小さいため検出されなかったものと考えられる。

図-4(a)に J-SHIS, 図-4(b)に統合した AVS30 を示し, 図-4(c)に J-SHIS の AVS30 を用いた補間推定震度分布, 図-4(d)に統合 AVS30 を用いた補間推定震度分布を示す。後背湿地で軟弱な地盤が広がっているものの, 観測点があるので (刈羽村役場), 地盤の差異はあっても震度分布に大きな差異はない結果となっている。

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震

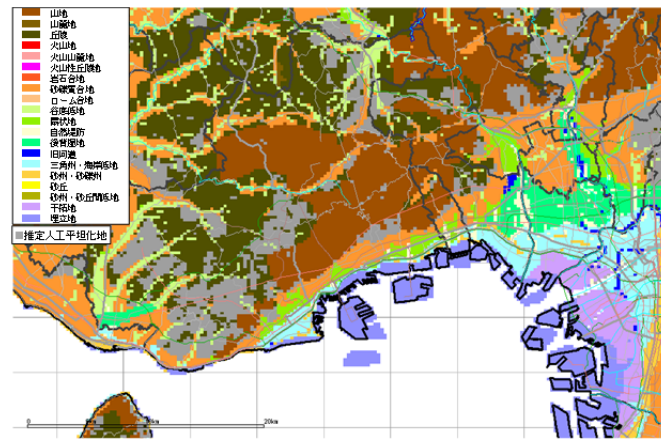
仙台市の造成地で宅地被害や埋設管被害が多く見られたので, 仙台市に着目して示す。図-5(a)に推定人工平坦化地を考慮した地形分類を示す。緑ヶ丘はローム台地であるので抽出されていないが, 南光台等の丘陵の住宅地は抽出されている。

ボーリングデータとして, 主に「みちのく GIDAS」を用い, K-NET 等を加える。図-5(b)に J-SHIS, 図-5(c)に統合した AVS30 を示し, 図-5(d)に J-SHIS の AVS30 を用いた補間推定震度分布, 図-5(e)に統合 AVS30 を用いた補間推定震度分布を示す。ボーリングデータと統合した AVS30 は, J-SHIS に比べ全体に大きくなっているが, ところにより小さくなっており, 空間変動が大きい分布となっている。

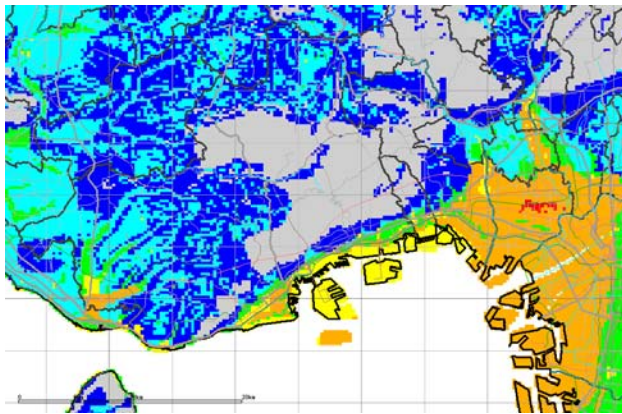
(5) 2016 年熊本地震

図-6(a)に推定人工平坦化地を考慮した地形分類を示す。火山山麓地にある益城町役場周辺などが抽出されているが, 神戸市や仙台市のような造成地とは異なるし, 山都町で広く抽出されているのは自衛隊の演習所であるので, この地域については見直しの余地があると考えられる。ボーリングデータは主に全国地質調査業協会連合会による「平成 28 年(2016 年)熊本地震 復興支援 ボーリング柱状図 緊急公開サイト」のデータを用いており, 地震観測記録は末富ら(2016)⁷⁾と共通である。

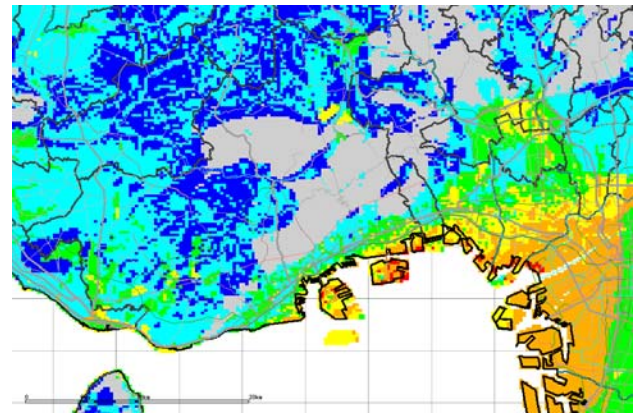
図-6(b)に J-SHIS, 図-6(c)に統合した AVS30 を示し, 図-6(d)に J-SHIS の AVS30 を用いた補間推定震



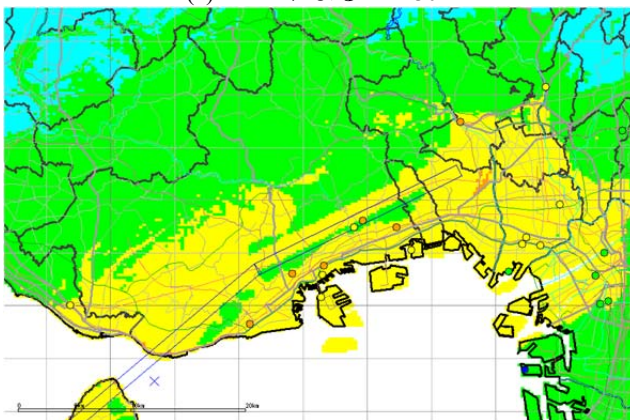
(a)推定人工平坦化地を考慮した地形分類



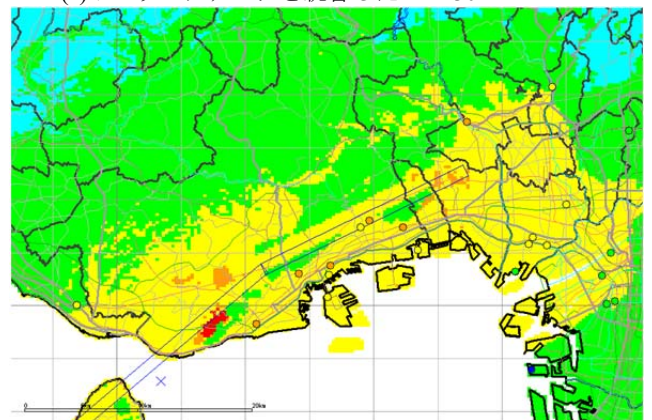
(b)J-SHIS による AVS30



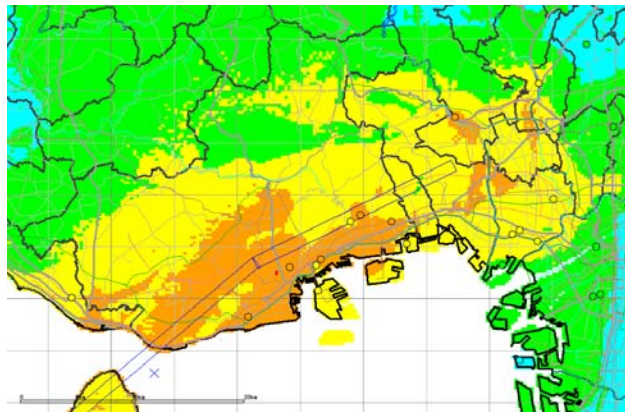
(c)ボーリングデータと統合した AVS30



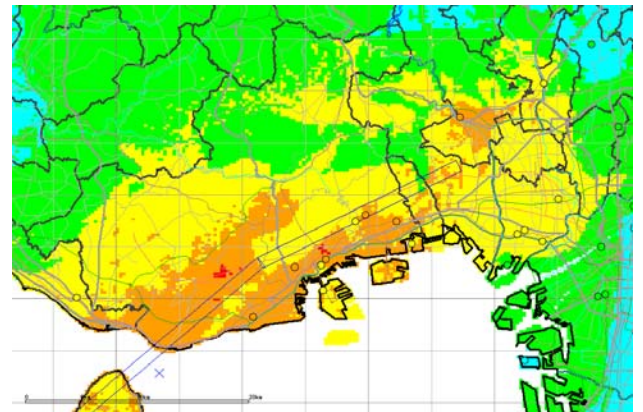
(d)(a)の AVS30 を用いた震度分布 (距離減衰)



(e)(b)の AVS30 を用いた震度分布 (距離減衰)

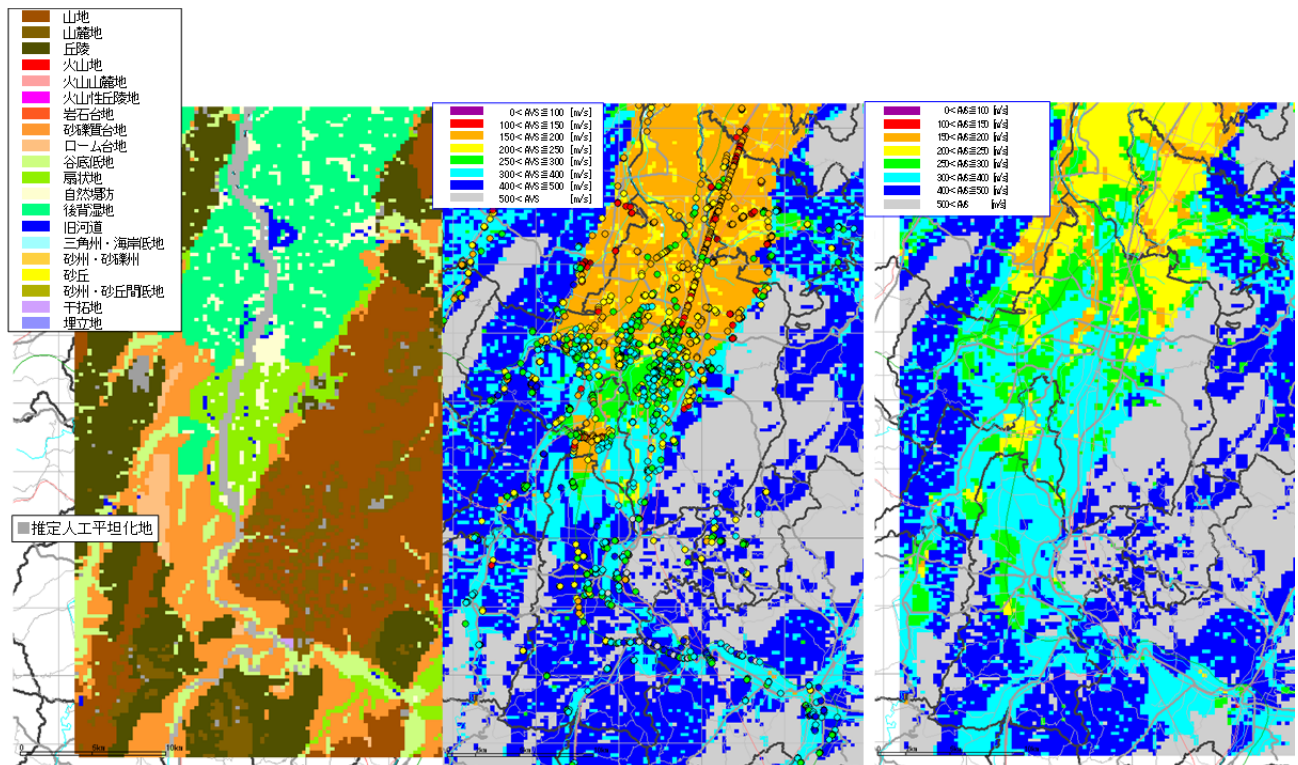


(f)(a)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)



(g)(b)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)

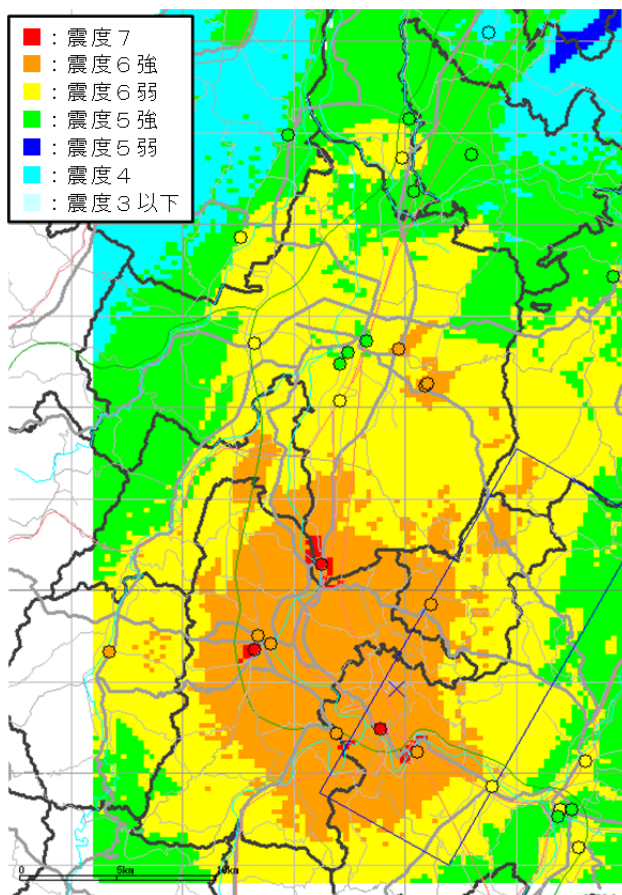
図-2 AVS30 と震度分布 (1995 年兵庫県南部地震)



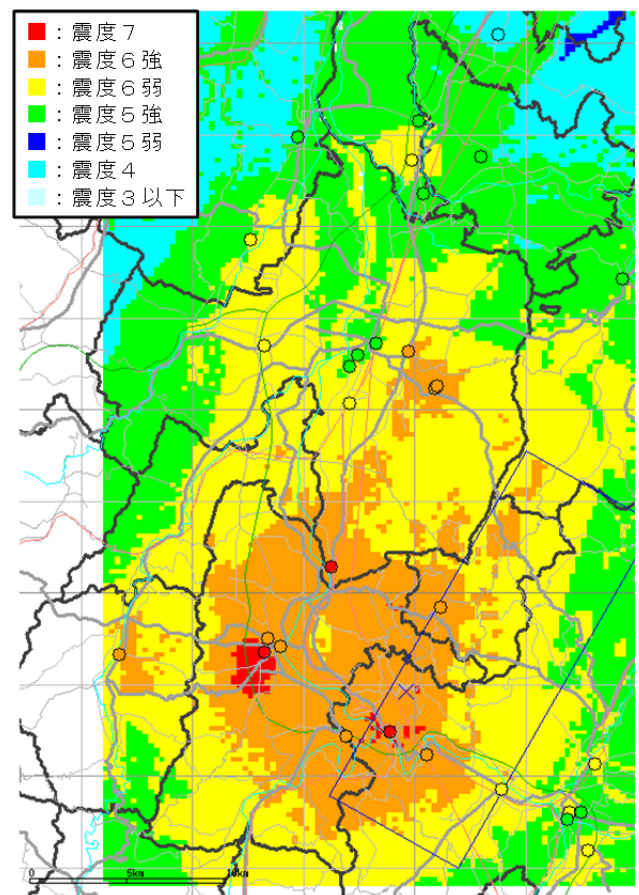
(a)推定人工平坦化地を考慮した地形分類

(b)J-SHIS による AVS30

(c)ボーリングデータと統合した AVS30

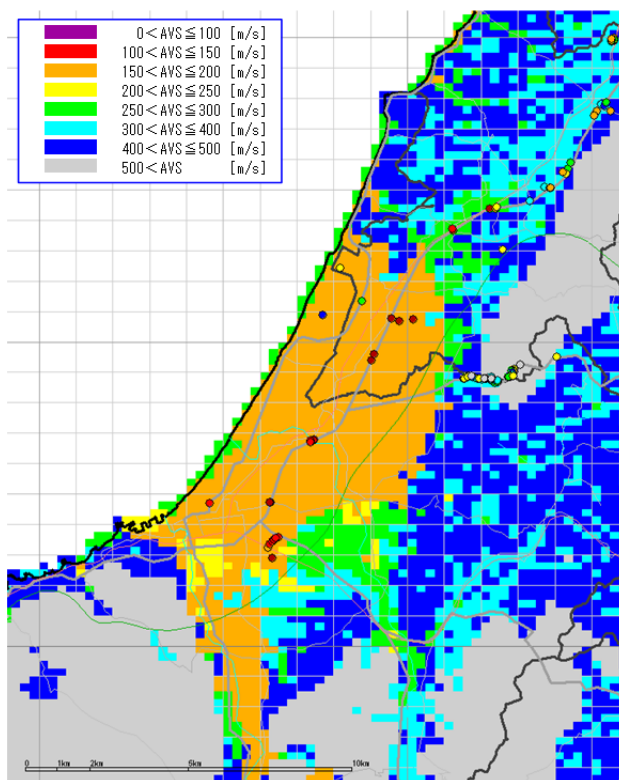


(d)(b)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)

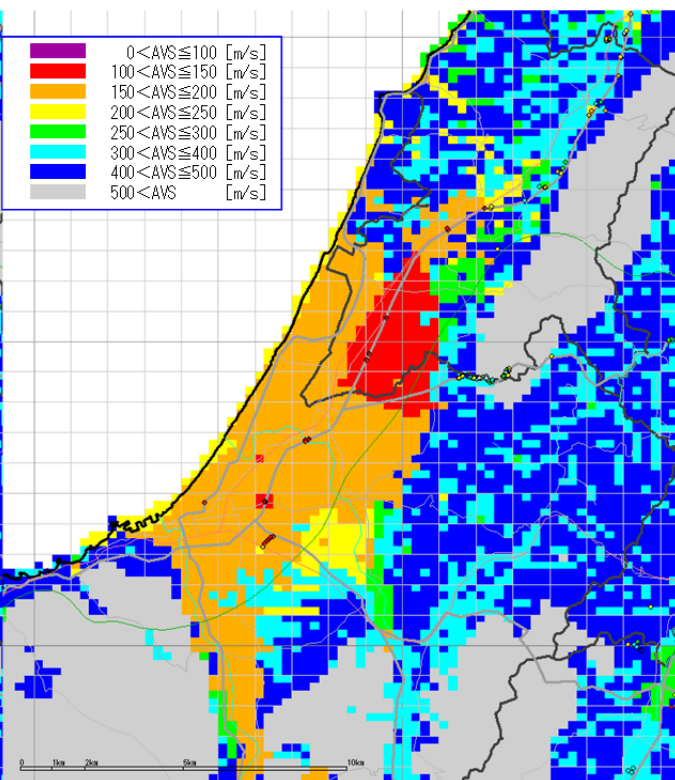


(e)(c)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)

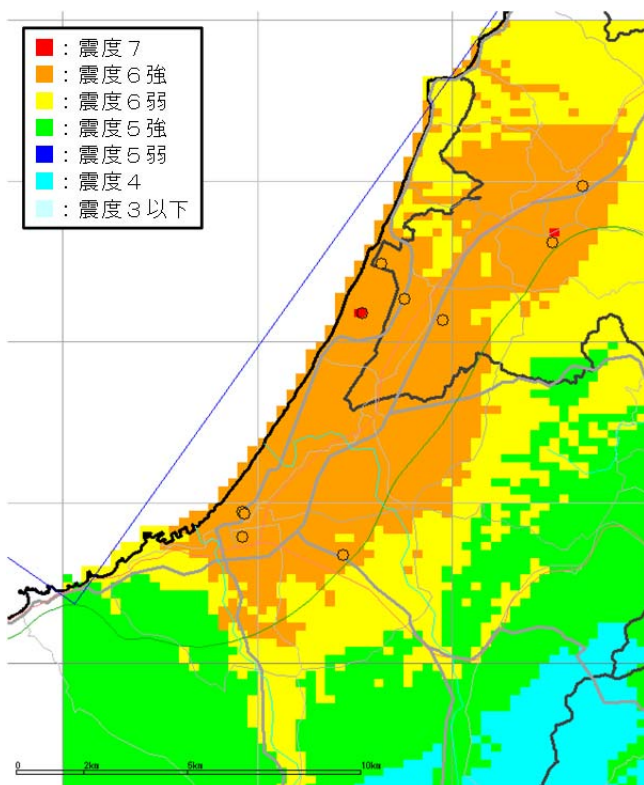
図-3 AVS30 と震度分布 (2004 年新潟県中越地震)



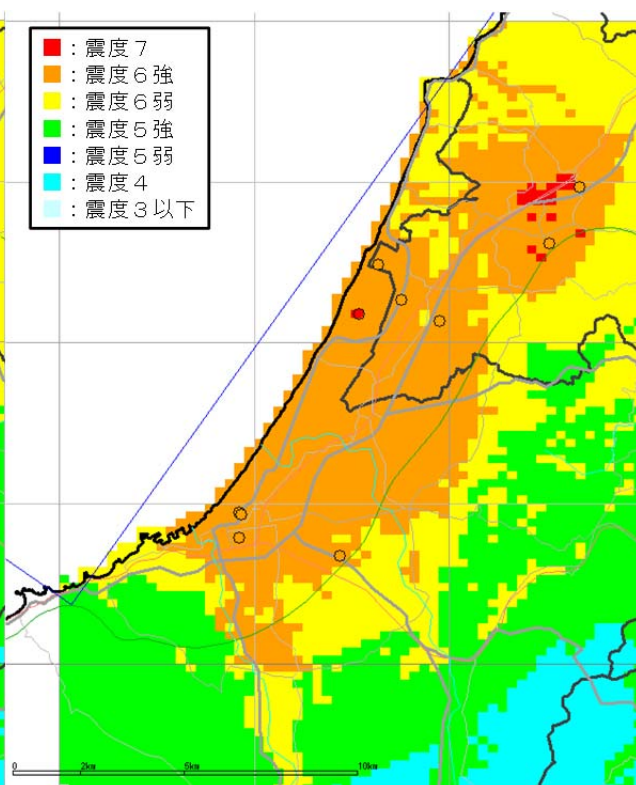
(a)J-SHIS による AVS30



(b)ボーリングデータと統合した AVS30

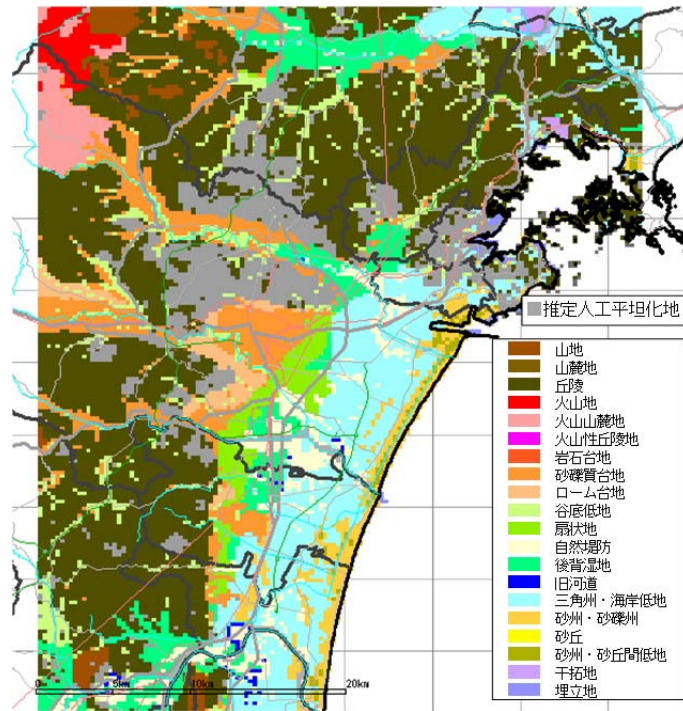


(c)(a)の AVS30 を用いた震度分布

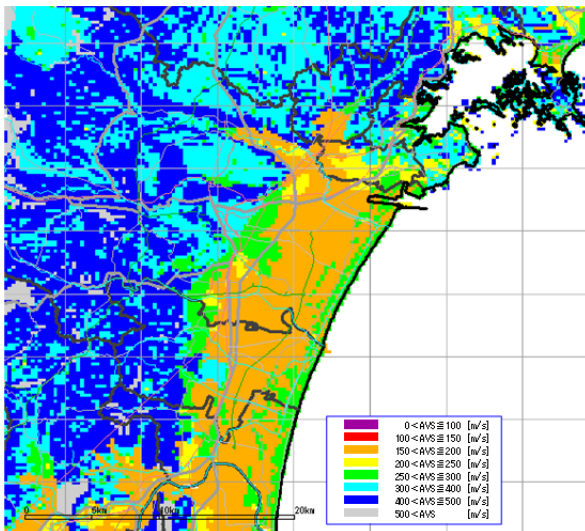


(d)(b)の AVS30 を用いた震度分布

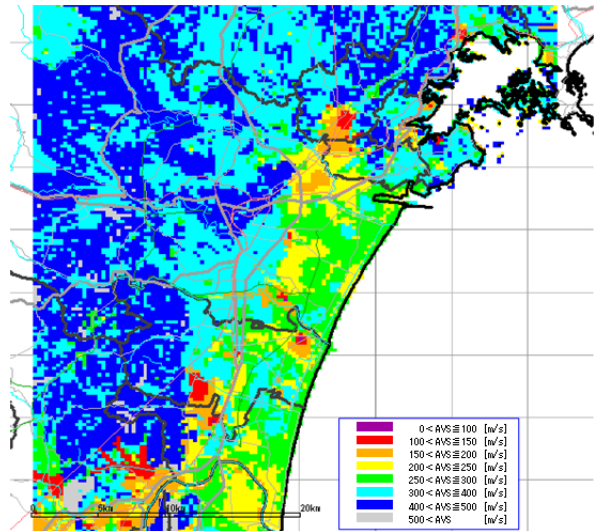
図-4 AVS30 と震度分布 (2007年新潟県中越沖地震)



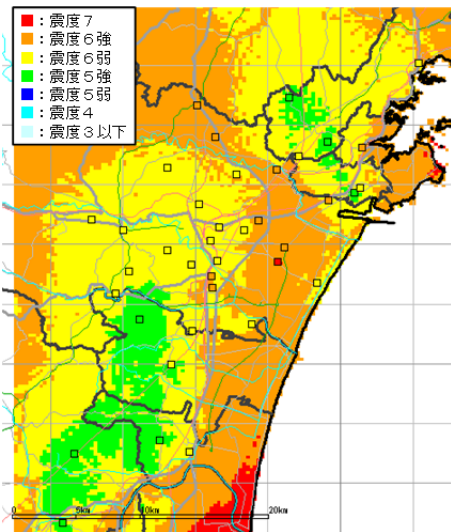
(a)推定人工平坦化地を考慮した地形分類



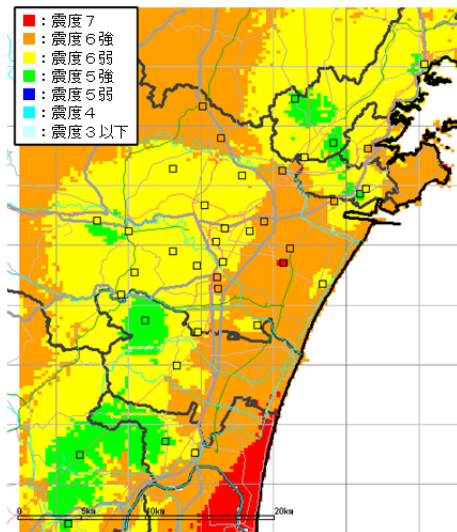
(b)J-SHIS による AVS30



(c)ボーリングデータと統合した AVS30

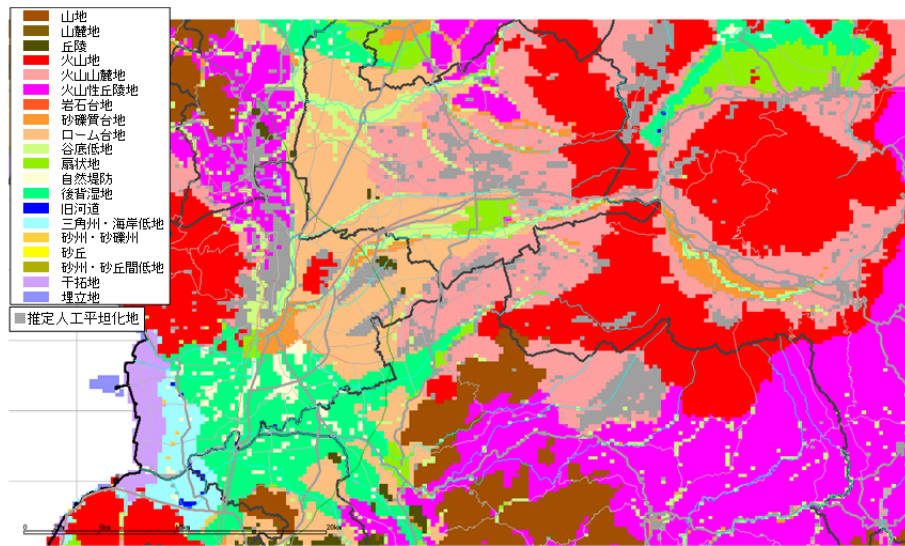


(d)(b)の AVS30 を用いた震度分布（補間推定）

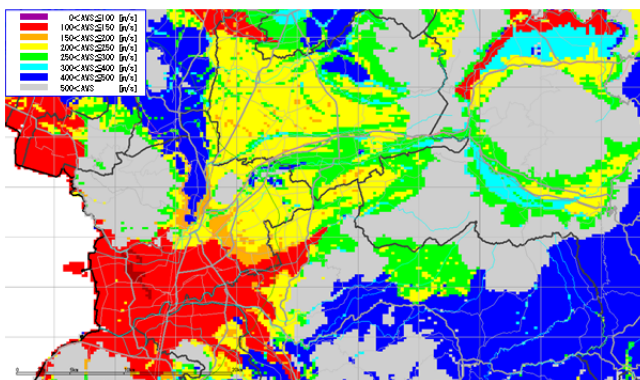


(e)(c)の AVS30 を用いた震度分布（補間推定）

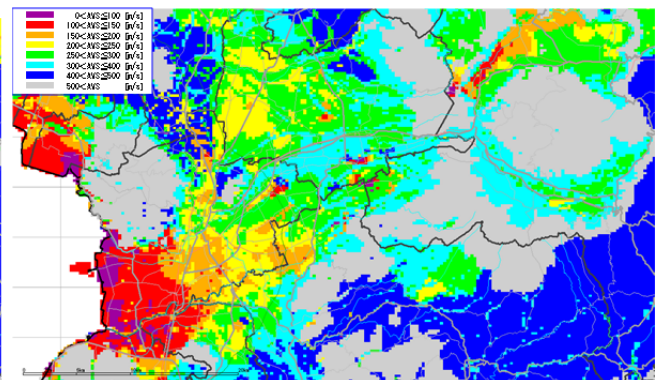
図-5 AVS30 と震度分布（2011 年東北地方太平洋沖地震：仙台市周辺）



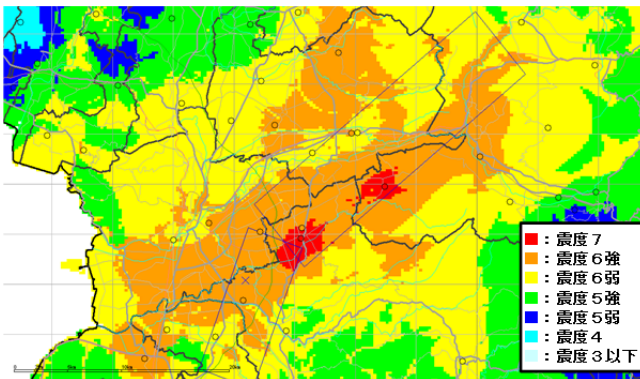
(a)推定人工平坦化地を考慮した地形分類



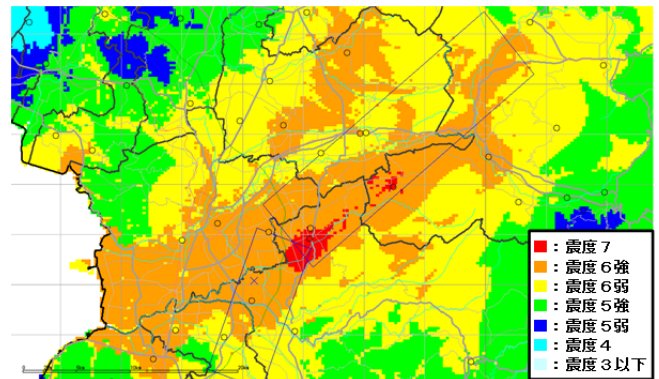
(b)J-SHIS による AVS30



(c)ボーリングデータと統合した AVS30



(d)(b)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)



(e)(c)の AVS30 を用いた震度分布 (補間推定)

図-6 AVS30 と震度分布 (2016 年熊本地震)

度分布, 図-6(e)に 統合 AVS30 を用いた補間推定震度分布を示す。ボーリングデータとの統合により, 火山山麓地と後背湿地の AVS30 は大きくなり, 干拓地と埋立地の AVS30 は小さくなっている。震度分布で図-6 (e)では埋立地まで震度 6 強が伸びている。この付近に地震計はなく, このように地震計がないエリアでは表層地盤の差異が現れる。

5. おわりに

本論文では, 推定人工平坦化地を考慮した地形分類に基づき, ボーリングデータとの統合 AVS30 を算

定し, 近年の国内の代表的被害地震である1995年兵庫県南部地震, 2004年新潟県中越地震, 2007年新潟県中越沖地震, 2011年東北地方太平洋沖地震, 2016年熊本地震, の5地震について震度分布を算定した。今後, 埋設管等の被害分析に活用していく予定である。

謝 辞

本論の作成に当たっては, ボーリングデータとして, (国研) 土木研究所のkunijiban, 関西圏地盤情報の活用協議会, 神戸JIBANKUN, 「活褶曲地帯における地震被害データアーカイブス」, 「みちのく

GIDAS」，全国地質調査業協会連合会による「平成28年(2016年)熊本地震 復興支援 ボーリング柱状図 緊急公開サイト」，強震観測記録として，(国研)防災科学技術研究所，気象庁，新潟県・熊本県・宮城県の震度計，NEXCOおよびJR（土木学会HPより），国土交通省（国土技術政策総合研究所HP，港湾空港技術研究所HPより），東北工業大学のSmall Titan，関西地震観測研究協議会，等を利用して頂きました．関係各位に感謝の意を表します．

参考文献

- 1)気象庁:推計震度分布図，<http://www.data.jma.go.jp/svd/cew/data/suikai/eventlist.html>
- 2)防災科学技術研究所:J-RISQ 地震速報，<http://www.j-risq.bosai.go.jp/report/>
- 3)国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室：東日本大震災地震動分布，2016 年熊本地震地震動分布，<http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm> (2017.8.7 閲覧)
- 4)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2017.8.7 閲覧)
- 5)末富岩雄，石田栄介，福島康宏，磯山龍二，澤田純男：地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と 2004 年新潟県中越地震における地震動分布の推定，日本地震工学会論文集，第7巻，第3号，pp.1-12，2007.
- 6)末富岩雄：2011 年東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた最大地動分布の推定，第14回日本地震工学シンポジウム，PS1-Thu-34，2014.
- 7)末富岩雄，福島康宏，尾茂淳平：2016 年熊本地震における最大地動分布の推定，日本地震工学会大会，2016.
- 8)若松加寿江，松岡昌志，久保純子，長谷川浩一，杉浦正美：日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.213-232，2004..
- 9)塚本博之，石田栄介，末富岩雄：地形・地盤分類 250m メッシュマップと国土数値情報を用いた人工平坦化地の推定，第34回地震工学研究発表会講演論文集，No.613，2014.
- 10)松岡昌志，若松加寿江，橋本光史：地形・地盤分類250mメッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法，日本地震工学会論文集，第11巻，第2号，pp.20-39，2011.
- 11)（独）防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー：文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「Ⅲ.1 震災総合シミュレーションシステムの開発」公開ソフトウェア，2007.
- 12)田村勇，山崎文雄：K-NET と横浜市強震計ネットワークの地盤調査データに基づく S 波速度推定式，土木学会論文集，No. 696/I-58，pp.237-248，2002.
- 13)例えば，東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告，土木編3 ライフライン施設の被害と復旧，2015.
- 14)片岡正次郎，佐藤智美，松本俊輔，日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式，土木学会論文集A，Vol.62，No.4，pp.740-757，2006.
- 15)藤本一雄，翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係，日本地震工学会論文集，第6巻，第1号，pp.11-22，2006.
- 16)文部科学省 科学技術振興調整費による研究プロジェクト：活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案、研究代表者：小長井一男

ESTIMATION OF MAP OF AVS30 AND JMA SEISMIC INTENSITY SCALE DURING RECENT DAMAGED EARTHQUAKES IN JAPAN

Iwao SUETOMI, Hiroyuki TSUKAMOTO, Yasuhiro FUKUSHIMA, Junpei OSHIGE and Naoto OHBO

Geomorphological land classification by J-SHIS (Japan Seismic Hazard Information Station) is often used for earthquake ground motion distribution estimation etc. However, this land classification does not consider artificial construction, and AVS30 (average shear-wave velocity up to 30m) are estimated from the average relational expression nationwide. In this study, considering the estimated artificial flattened area, we constructed the data of AVS30 of J-SHIS integrated with the borehole data and calculated the distribution of JMA seismic intensity scale in the typical damaged earthquakes in recent years in Japan.