

空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討

末富岩雄¹・石田栄介²・磯山龍二²

¹防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー (〒210-0006 神奈川県川崎市川崎区砂子2-6-2)

E-mail: suetomi@kedm.bosai.go.jp

²日本技術開発株式会社 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: isidae@jecc.co.jp, isoyama@jecc.co.jp

地震発生直後に震度計などの地震観測値から地震動分布推定さらに建物等の被害推定を行って、初動対応等に活用する即時地震防災システムの導入が増えている。しかしながら、その推定精度の検証例は少ないというのが現状である。本研究では、近年の地震におけるケーススタディに基づき、補間手法、増幅度評価手法など、地震動分布の推定精度に関わる因子ごとに高精度化のために必要な条件を検討し、地盤の非線形化の影響を考慮した増幅度モデルを提案した。また、2004年新潟県中越地震における地震動分布推定のケーススタディにより、早期に多くの観測情報を収集することが必要であることを示した。

Key Words : Amplification factor of shallow soil deposits, Nonlinear effect, Mean shear wave velocity, Peak ground motion, Site effect

1. はじめに

地震発生後の初動では、災害対応体制を早く構築し、的確に人員配置や応援要請等を行うことが極めて重要である。被害の全体像を早く把握するため、被害推定システムが国や自治体等の様々な機関で導入されている。文部科学省による「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の「1 震災総合シミュレーションシステムの開発」では情報技術(IT)を活用し発災後の災害対応行動を最適化することを目的とした次世代防災情報システムの構築を目指している¹⁾。本研究は、その一環として地震動分布推定を高精度に行うための手法を提案するものである。

地震観測網を利用する即時被害推定で精度良く地震動分布を評価するためには、表層地盤の増幅特性評価が大変重要である。地震動分布を推定するためには、地盤パラメータのデータベース作成、地盤の非線形化の影響を考慮した増幅度評価、観測点配置・収集と補間手法、などについて検討する必要がある。本研究では、これらについて考察し、2004年新潟県中越地震のデータを用いて検証する。

2. 地盤データ整備

近年では、横浜市の地震防災システム及び地震マップ²⁾、内閣府による地震マップ作成のケーススタディ³⁾、東京ガスの地震防災システム⁴⁾など、首都圏では細密な50mメッシュでの地震動分布評価が行われる例が増えている。深度20mもしくは30mまでの平均S波速度(以後、AVS(d): dは深さ(m))やSn値のような地盤パラメータを50mメッシュなど高密度に評価する場合、できるだけ多くのボーリングデータを収集してパラメータを求め、その空間補間によりメッシュ毎の値を算出することになる。したがって、ボーリングデータ数が大きく精度に影響することになることは言うまでもない。

先に述べたプロジェクトでは、川崎市をモデル都市として選定し、詳細シミュレーションを実行するための各種のデータ整備を現在行っている。地盤データの収集についても、川崎市のボーリングデータのデジタル化を行い、以前からデジタル化されていたもの(約1400点)も含め、約8000本のデータベースを作成した⁵⁾。1400点から50mメッシュデータを補間により作成した際は滑らかであったが、デ

ータ密度が高まったことにより，局所的な変化も捉えた地盤パラメータデータベースを構築することができた．特にデータ密度が高まった川崎市北西部の丘陵地で，両者の差は大きくなっている．

近年よく用いられる AVS(d)を算出する際，ほとんどの地点では N 値情報しか得られていないので，N 値から S 波速度を推定することになる．この際，回帰式の選択によって得られる S 波速度も異なってくる．図-1 は，道路橋示方書による式⁶⁾と田村・山崎による式⁷⁾を比較したものである．砂の場合に両者の差異は大きい．特に N 値が小さい場合の評価は増幅度に大きく影響を及ぼすので，川崎市での AVS(20)を評価した結果を比較すると，東南部の海側で差が大きくなっている．地域によって適用性は異なってくると思われ，地震観測記録との比較等により，適切な関係式を選択する必要がある．

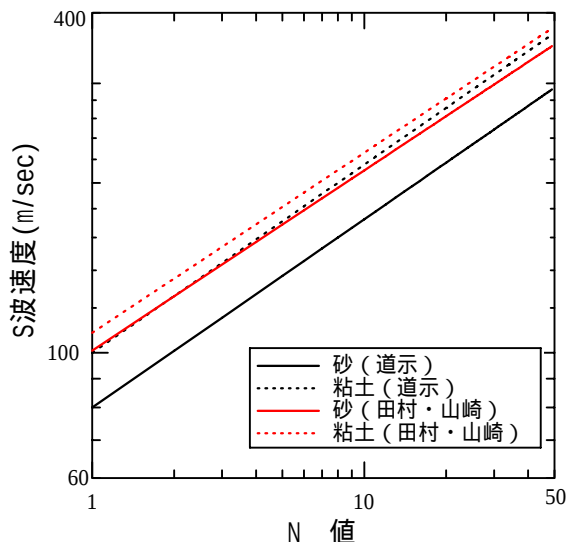


図-1 回帰式による N 値と S 波速度の差異

3．表層地盤の増幅度モデル

表層地盤による増幅度を精度良く評価することは重要であり，前述の地盤パラメータとの経験的關係式から評価される場合が多い．しかしながら，本来震度 6 以上の大地震時に利用するためのものでありながら，そのような強震時における地盤の非線形化の影響を充分考慮していないものが少なくない．末富ら⁵⁾は，そのような観点から，最大加速度，計測震度，SI 値について非線形を考慮した増幅度モデルを提案した．最大速度については非線形化の影響を考慮する必要はないことも指摘した．しかしながら，検証を行ったところ，最大加速度，SI 値については，n 次式による関数形⁵⁾では，パラメータの

値によっては不自然な形になることがあった．

そこで本研究では，式(1)の 2 次式に変更したモデルを提案し，パラメータもこれまでの観測事例や地震応答解析結果の分析に基づきつつ，実データでの検証を通じて，矛盾が生じないようにパラメータを再調整する．

$$\begin{aligned} X_S &= \alpha \cdot X_b & (X_b \leq X_1) \\ X_S &= X_L - \beta \cdot (X_b - X_2)^2 & (X_1 < X_b < X_2) \\ X_2 &= \frac{2}{\alpha} X_L - X_1 \\ \beta &= \frac{X_L - \alpha \cdot X_1}{(X_2 - X_1)^2} \\ X_S &= X_L & (X_b \geq X_2) \end{aligned} \quad (1)$$

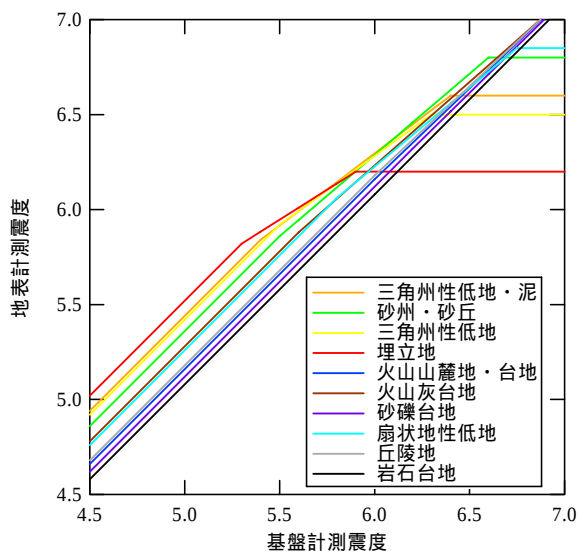
計測震度については，末富ら⁵⁾による関数形である式(2)を用いる．

$$\begin{aligned} \lambda_{IJ} &= \alpha_{IJ} & (IJ_b \leq IJ_1) \\ \lambda_{IJ} &= \alpha_{IJ} - \beta_{IJ} (IJ_b - IJ_1) & (IJ_1 < IJ_b \leq IJ_2) \\ \beta_{IJ} &= \frac{\alpha_{IJ} - IJ_L + IJ_2}{IJ_2 - IJ_1} \\ \lambda_{IJ} &= IJ_L - IJ_b & (IJ_2 \leq IJ_b) \end{aligned} \quad (2)$$

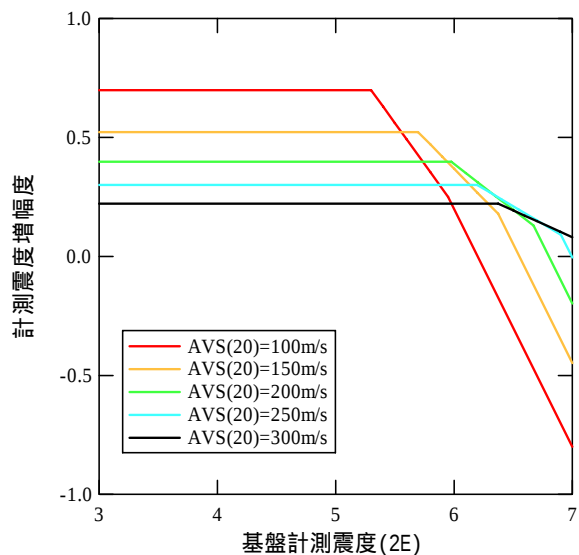
地盤パラメータとの関係は，末富ら⁵⁾と同様に大西らによる地形分類と深度 20m までの平均 S 波速度 AVS(20)について評価する．計測震度に関するパラメータを，地形分類については表-1，AVS(20)については式(3)～(6)で与える．この増幅度モデルから得られる基盤計測震度と地表計測震度の関係を図-2 に示す．パラメータは，工学的基盤の S 波速度を 500m/s とした時の値である．

表-1 計測震度増幅度パラメータ

分類	α_{IJ}	IJ_1	IJ_2	IJ_L
埋立地	0.52	5.3	5.9	6.2
砂州・砂丘	0.36	5.5	6.6	6.8
三角州性低地 (泥・粘土)	0.44	5.4	6.4	6.6
三角州性低地 (砂まじり)	0.42	5.5	6.3	6.5
扇状地性低地	0.26	5.8	6.75	6.85
火山灰台地	0.28	5.6	7.1	7.2
砂礫台地	0.12	6.2	7.3	7.4
岩石台地	0.08	-	-	-
丘陵地	0.18	6.0	7.3	7.4
火山山麓地	0.16	6.0	7.4	7.5
山地	0.00	-	-	-

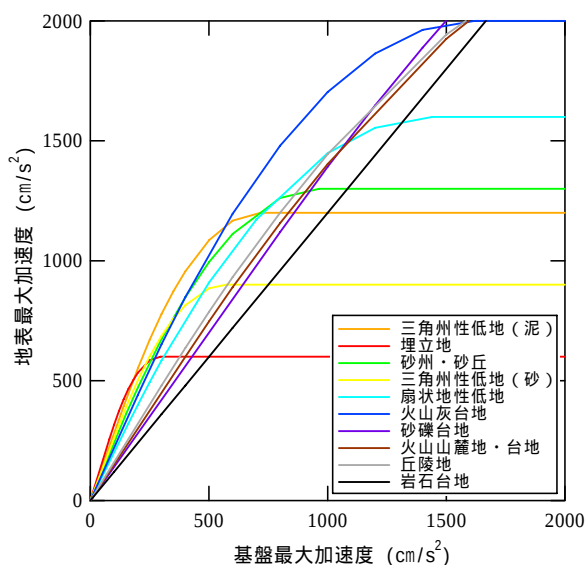


(a)地形分類

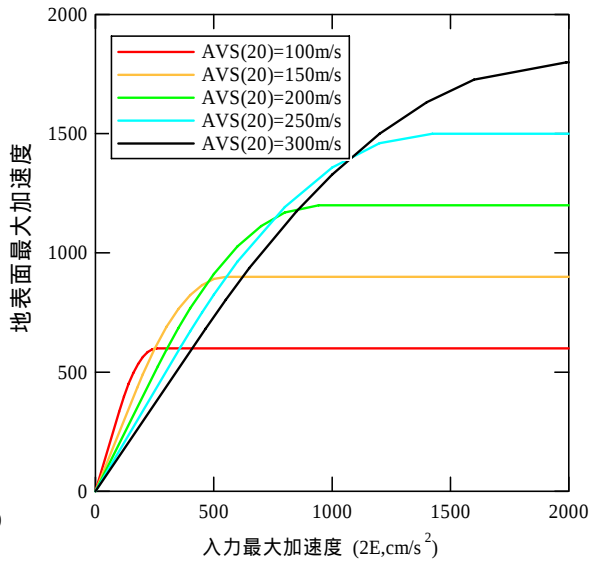


(b)AVS20

図-2 計測震度に関する地盤の増幅関係

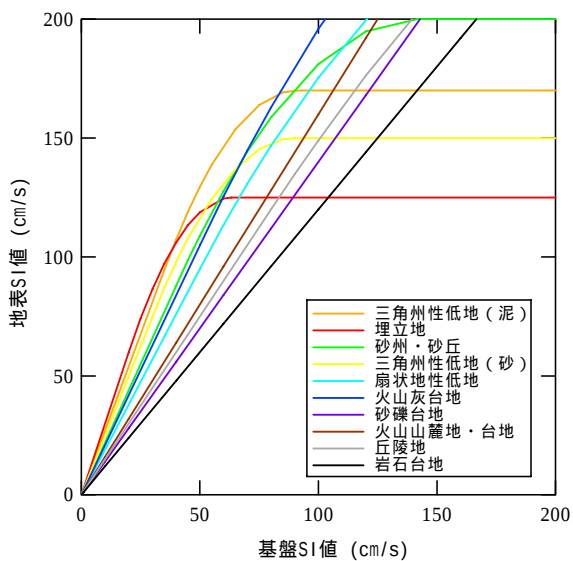


(a)地形分類

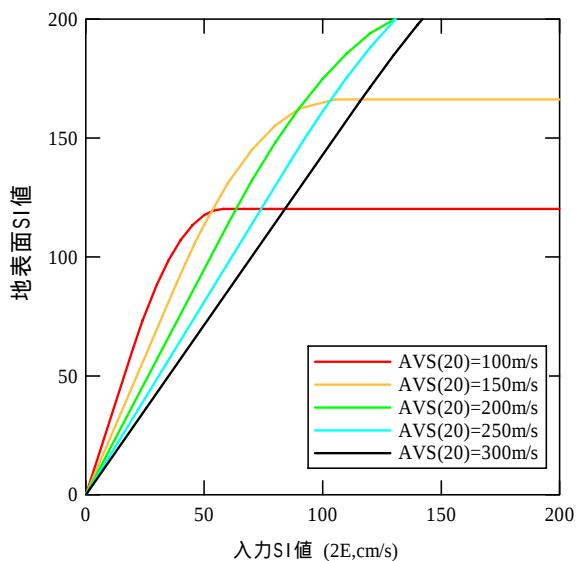


(b)AVS20

図-3 最大加速度に関する地盤の増幅関係



(a)地形分類



(b)AVS20

図-4 SI 値に関する地盤の増幅関係

表-2 最大加速度増幅度パラメータ

地形分類	α	X_1	X_L
埋立地	3.2	80	600
砂州・砂丘	2.4	120	1300
三角州性低地 (泥・粘土)	2.8	140	1200
三角州性低地 (砂まじり)	2.6	120	900
扇状地性低地	2.0	160	1600
火山灰台地	2.2	200	2000
砂礫台地	1.4	800	3600
岩石台地	1.2	-	-
丘陵地	1.6	300	2500
火山山麓地	1.5	400	2700
山地	1.0	-	-

表-3 SI 値増幅度パラメータ

地形分類	α_{SI}	SI_1	SI_L
埋立地	3.0	20	125
砂州・砂丘	2.2	40	200
三角州性低地 (泥・粘土)	2.7	35	170
三角州性低地 (砂まじり)	2.5	30	150
扇状地性低地	1.9	50	250
火山灰台地	2.1	50	300
砂礫台地	1.4	-	-
岩石台地	1.2	-	-
丘陵地	1.5	80	360
火山山麓地	1.6	-	-
山地	1.0	-	-

$$\alpha_{IJ} = 2.699 - \log(AVS20) \quad (3)$$

$$IJ_1 = 0.8 + 2.25 * \log(AVS20) \quad (4)$$

$$IJ_2 = 1.15 + 2.4 * \log(AVS20) \quad (5)$$

$$IJ_L = 2.2 + 2.0 * \log(AVS20) \quad (6)$$

最大加速度に関するパラメータを，地形分類については表-2，AVS(20)については式(7)～(9)で与える．この増幅度モデルから得られる基盤最大加速度と地表最大加速度の関係を図-3 に示す．地形分類では埋立地や三角州性低地，AVS(20)では 150m/s より小さい場合に，顕著な地盤の非線形化の影響を受け，最大加速度は頭打ちとなる．

$$\log(\alpha_{PGA}) = 2.024 - 0.75 * \log(AVS20) \quad (7)$$

$$\log(PGA_1) = 1.4 * \log(AVS20) - 0.8 \quad (8)$$

$$\log(PGA_L) = 1.0 * \log(AVS20) + 0.778 \quad (9)$$

SI 値に関するパラメータを，地形分類については表-3，AVS(20)については式(10)～(12)で与える．この増幅度モデルから得られる基盤最大加速度と地表最大加速度の関係を図-4 に示す．

$$\log(\alpha_{SI}) = 1.889 - 0.7 * \log(AVS20) \quad (10)$$

$$\log(SI_1) = 1.6 * \log(AVS20) \quad (11)$$

$$\log(SI_L) = 0.8 * \log(AVS20) + 0.48 \quad (12)$$

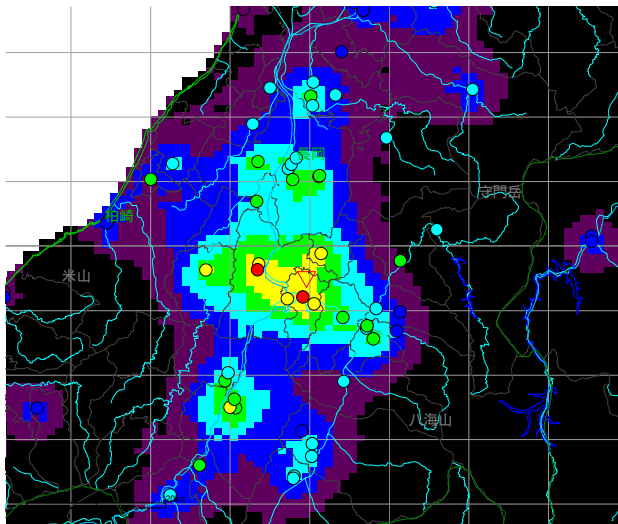
SI 値の場合，最大加速度ほどには地盤の非線形化の影響は受けないが，基盤上で 50cm/s を越えるような大地震動では地盤が軟らかい条件のところで非線形化の影響が顕著になる．

3．新潟県中越地震における観測記録による空間補間手法の検証

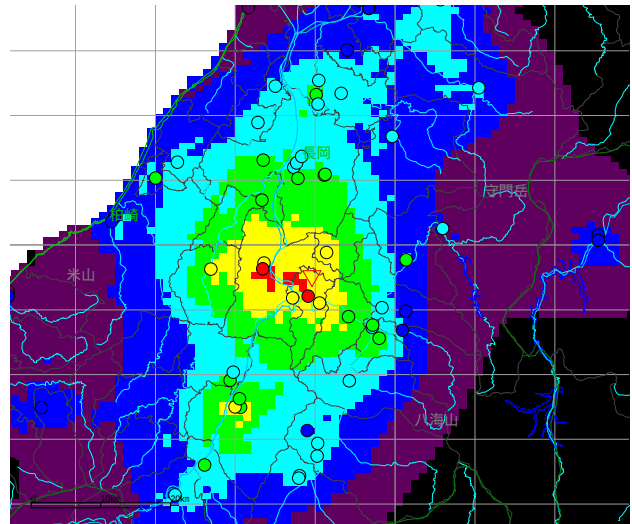
現在，地震動強度指標を対象とした実際のシステムや研究で使われている空間補間方法は，1)距離による重み(IDW 法)，2)形状補関数による補間，3)クリッキング(Kriging)，である．1)は，対象点の近くのデータ値を距離の逆数に基づく重み係数で加重平均し，対象点の値を推定するものである．2)は，離散的な形で与えられた関数の離散点間の値を補って連続関数として扱うための技法で，有限要素法においては，節点における関数値の間を補って要素内の連続関数を作る技法として用いられている．1)2)が決定論的手法であるのに対し，3)はサンプル・ポイントの空間的自己相関性を含む統計モデルに基づいている．クリッキング法にも条件に応じていくつかあるが，山崎ら⁹⁾が用いているように，平均値(トレンド成分)と共分散値を既知とする Simple Kriging 法が，観測網を利用した地震動分布推定に最も適切と思われる．

多くの強震記録が得られている新潟県中越地震(2004年10月23日，M=6.8)について地震動分布推定を行い，補間手法・条件等について比較を行う．川口町役場では，震度計で初めて震度7を観測しており，他にも参考値ながら震度7の記録が得られている．また，長岡市では様々な機関による地震動観測値が得られており，高密度に分布を知ることができる．1kmメッシュの地形分類による増幅度を用いて，計測震度の空間補間推定を行う．

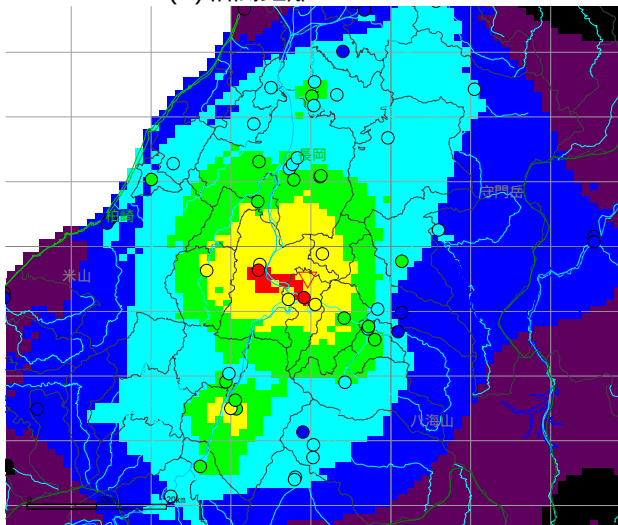
クリッキング法において，相関距離を5，10，20，30kmと変えたケースの比較を図-5に示す．補間には，279地点(K-NET:134，KiK-net:92，JH:11，JR:13，気象庁・新潟県:29)での観測値を用いて



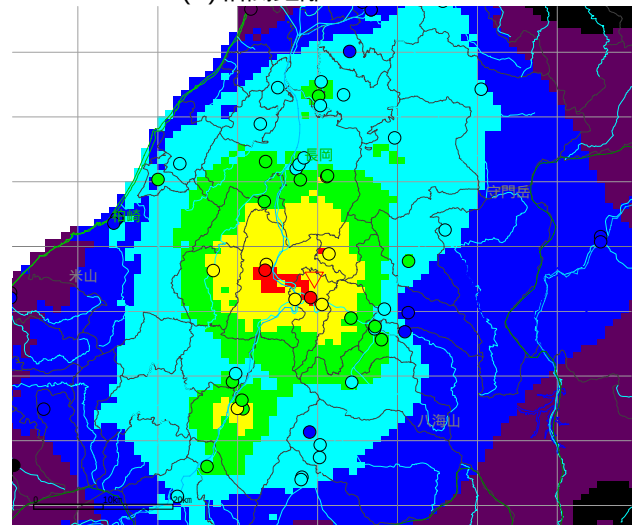
(a) 相関距離 5km



(b) 相関距離 10km

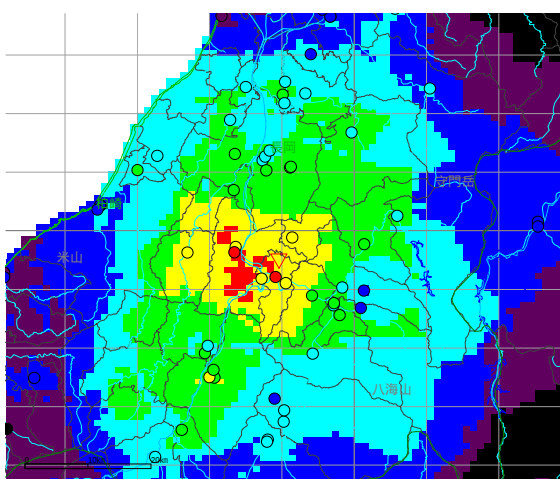


(c) 相関距離 20km

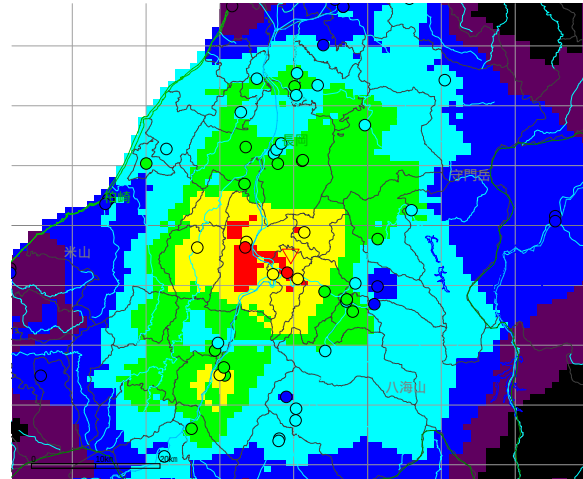


(d) 相関距離 30km

図-5 クリッキング法による計測震度の補間推定結果



(a) n=1

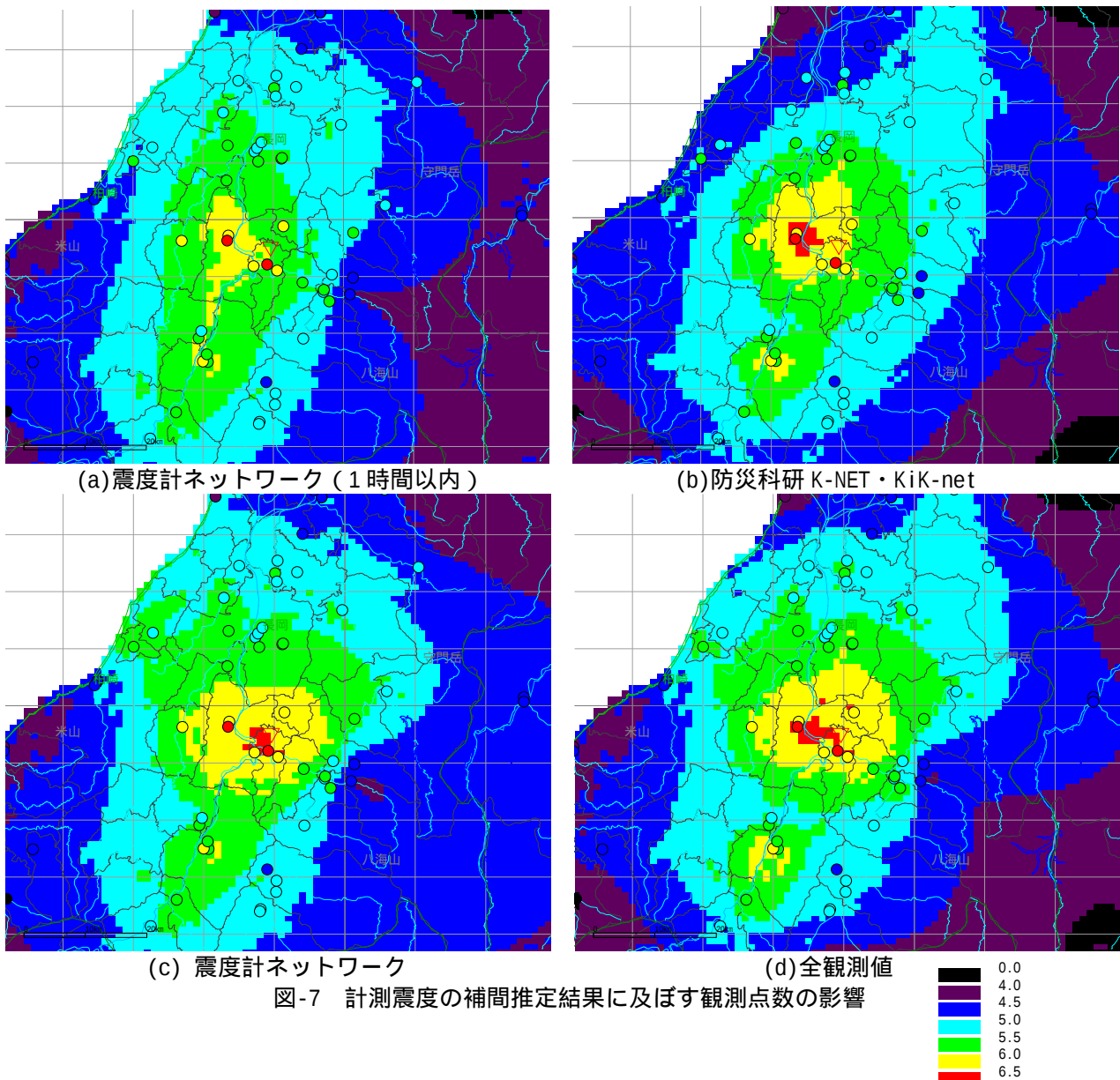


(b) n=2

図-6 IDW 法による計測震度の補間推定結果 (有効距離 30km)

おり¹⁰⁾、観測値を●で示している．十日町市は大きな揺れが観測された場所なので、その影響が明瞭に現れている．相関距離の値によって、結果は大きく異なることがわかる．相関距離 5km の場合は、トレンド成分の影響が強すぎ、観測値が峰になって

いるところが多く見られる．地震発生直後に利用するので震源情報のみから距離減衰式をトレンド成分として作成している．断層の広がり方を考慮していない影響も考えられ、また観測点間隔によって適切な相関距離も変わってくると思われるが、現状の震度



計ネットワークや K-NET を利用する場合は相関距離として 20km 程度が妥当かと思われる。

IDW 法において距離の重みのべき数を $n=1$ と $n=2$ のケースで比較した結果を図-6 に示す。クリッキング法における相関距離ほどの違いは見られない。また、対象範囲を指定する有効距離は計算値そのものにはほとんど影響しないが、過小になると計算を行わない空白メッシュが多く生まれ、過大になると若干計算時間に影響する。この問題については、観測網によって決まるので、事前に最適値を求めることは可能である。

計算結果と●で示した観測値の対応は良好である（多くの観測値の色は周囲に一致している）。中央省庁レベルでの早期被害推定（市町村単位の被害推定）には充分であろう。しかしながら、長岡市では東部で中心部の 2 倍程度の揺れが観測されており、

そこまでは図-5, 6 の計算では表現できておらず、市町村レベルのニーズには充分でない。これは、1km メッシュの国土数値情報を用いたためである。ボーリングデータや 1km メッシュより詳細な地形分類を用いることで改善されると考えられる。

なお、今回は多くの観測値を用いたが、地震発生直後にこれだけの数は現状では利用できない。新潟県震度計ネットワークのみでは強震域付近の観測点数は大幅に減る上に、気象庁直轄観測点数以外からは、1 時間以内に送信できたところの方が少ない¹¹⁾。自治体でこのような地震被害推定システムを導入する上での最大の課題は、地震計ネットワークの通信機能の脆弱さである。そこで、補間に利用する観測点数による比較を行った結果を図-7 に示す。図 a) の地震発生から 1 時間以内の気象庁・新潟県震度ネットワークの震度情報のみでは、他のケースに比べ

震度7のエリアがないなど全体に大震度域が狭い．公益企業による観測値も含めた場合には，きめ細かい推定が可能となっており，震度情報を早期に共有することで，地震発生当日の対応を速やかにすることが可能になると思われる．

5．地震動分布推定シミュレータ

以上の検討に基づき，地震動分布推定シミュレータを開発した¹²⁾．これは，以下の特徴を有する．

- ・最大加速度，最大速度，計測震度，SI値，加速度応答スペクトルについて，増幅度評価を含めた空間補間による地震動分布推定機能を有している．
- ・空間補間推定法について，クリッキング法，IDW法，形状補間法を選択できる．
- ・地盤増幅度モデルには，平均S波速度，Sn値など地盤パラメータに応じ，各種選択可能である．

今後，検証とマニュアル整備を進め，公開する予定である．

6．おわりに

本研究では，地震発生直後に地震計から得られる観測情報に基づき，精度良く地震動分布を推定する方法について検討を行い，以下の知見が得られた．

- 1) 地盤データベースの構築が重要であることを示した．
- 2) 地盤の非線形化の影響を考慮した増幅度モデルを構築した．
- 3) 2004年新潟県中越地震における震度分布推定により，補間パラメータの影響を示し，早期に多くの観測情報を収集することが重要であることを示した．

本研究では，土木学会調査団や各機関のホームページ等から，2004年新潟県中越地震における気象庁，新潟県，防災科研，国土交通省，日本道路公団，東日本旅客鉄道株式会社，等による観測記録または最大値指標を利用させて頂きました．関係各位に感謝の意を表します．なお本研究は，文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったものである．

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所川崎ラボラトリー・ホームページ： <http://www.kedm.bosai.go.jp/>
- 2) 横浜市ホームページ： <http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/index.html>
- 3) 内閣府防災担当ホームページ：
<http://www.bousai.go.jp/index.html>
- 4) 石田栄介，磯山龍二，山崎文雄，清水善久，中山渉：防災 GIS を用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面的分布推定に関する検討，土木学会地震工学研究発表会，pp.421-424，2001.
- 5) 末富岩雄，石田栄介，磯山龍二，後藤洋三：地盤の平均S波速度による地震動強度指標の非線形増幅度評価法について，土木学会地震工学論文集，Vol.27，pp.122-129，2003.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V.耐震設計編，1996.
- 7) 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.
- 8) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.79-91，1999.
- 9) 山崎文雄ら：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.3491-3496，1998
- 10) 澤田純男，後藤洋三，末富岩雄，福島康宏：強震記録，土木学会(第1次)・地盤工学会合同調査団 調査速報 2.2 節，<http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/chuetsu/2-2.pdf>，2005.
- 11) 気象庁：平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震について - 速報 - ，平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震に関する各種資料等，2004.
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2004_10_23_niigata/sokuho/index.html
- 12) 末富岩雄，後藤洋三，坪田正紀，栗山利男：地震動強度指標の空間補間手法の実用性から見た一検討，土木学会第59回年次学術講演会，2004.

(2005. 6. 13 受付)

A PROCEDURE FOR HIGH-ACCURACY MAP OF PEAK GROUND MOTION USING OBSERVED RECORDS

Iwao SUETOMI, Eisuke ISHIDA and Ryoji ISOYAMA

In order to consider nonlinear characteristics of soft ground, we propose a new amplification function which has four parameters such as an amplification factor during weak motions and the upper limit depending on shear strength of the soil deposits. Earthquake response analyses are carried out with many conditions and 4 parameters are decided. Topography classifications and a predominant period have been often used as ground parameter, but in late years the use of average S-wave velocity increases. Therefore, we connect average S-wave velocity to 20m or 30m deep with four parameters in order to apply to the area where boring data are provided to high density.