

# 高密度な観測SI値に基づく 首都圏の揺れ易さの検討

乗藤雄基<sup>1</sup>・猪股渉<sup>1</sup>・末富 岩雄<sup>2</sup>・石田 栄介<sup>2</sup>・  
山崎文雄<sup>3</sup>・鈴木崇伸<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京ガス株式会社 防災・供給部 防災・供給グループ (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail: inomataw@tokyo-gas.co.jp, norito@tokyo-gas.co.jp

<sup>2</sup>株式会社エイト日本技術開発 東京支社 保全・耐震・防災部

(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp, fukushima-ya@ej-hds.co.jp, ishida-e@ej-hds.co.jp

<sup>3</sup>千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻教授 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>4</sup>東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: tsuzuki@toyonet.toyo.ac.jp

東京ガスのリアルタイム地震防災システム「SUPREME」では、首都圏に約4,000点の超高密度地震観測網からSI値等を収集し、地震被害推定を行う。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際には、約5分間で観測SI値等を収集し、地震発生から10分後に50mメッシュのSI値分布を算出し、初動判断のための情報を提供している。観測開始から約10年経過し、これまでに多くの記録が蓄積されている。本論文では、地震観測記録から各観測点での平均SI値増幅度を、K-NETの地震観測記録を活用して算出した。これにより、東京東部低地、西部の丘陵地帯、地形が複雑な横浜市内の特性を把握した。そして、様々な地盤条件での観測記録が得られているので、得られたSI値増幅度と地形分類の関係、平均S波速度との関係を検討し、観測点により大きく値は異なるものの、平均的には低地でよく揺れる従来の関係と調和的であることが分かった。

**Key Words :** *amplification factor, average S-wave velocity, dense array observation, SI value, capital region*

## 1. はじめに

東京ガスでは都市ガス供給の地震時安全性確保のため、リアルタイム地震防災システム「SUPREME」を運用している<sup>1)</sup>。これは、地震計が約4,000箇所に設置され、平均では0.9km<sup>2</sup>に1点という超高密度地震観測による観測SI値から地震動分布・液状化危険度分布を50mメッシュで算出し、さらにはガス導管の被害推定を行って、初動判断に活かすものである。2011年東北地方太平洋沖地震においても、震度5弱～5強の揺れが広域で観測され、14基で感震遮断を行うと共に、約5分でSI値等の情報を収集し、約10分後には50mメッシュのSI値を推定した。その推定精度は、K-NET等の補間に用いていない他機関の観測値と比較したところ、非常に高い精度で推定していることが確認できた<sup>2)</sup>。

これは、多数の地震計を設置し地震間隔が短いことの寄与が大きいものであり、事前の防災対策に用

いる際などの精度を向上させるためには、表層地盤によるSI値増幅度をよりきめ細かく評価することが望まれる。そのために、本論文では、これまでの約10年間に約4,000点の観測点で蓄積された地震観測記録を活用し、地震観測点毎に平均的なSI値増幅度を算出する。合わせて、得られたSI値増幅度と地形分類の関係や深さ20mまでの平均S波速度AVS20との関係について検討する。

## 2. 地震観測記録の概要

地震観測記録の波形データは、設備の点検時に合わせて回収されている。2011年東北地方太平洋沖地震の際には、オンラインを含めた臨時回収を行い、ノイズで記録が消去されないように努めた。このようにして、蓄積された地震観測記録データベースにおいて、各観測点毎の地震観測数を図-1に示す。2185点で、3地震以上を観測している。なお、後述するSI値増幅度を算出する目的から、100点以上

で観測記録が得られている地震を対象地震を絞り、観測記録毎にも SI 値が 1.0 カインを超えるものに絞っている。実際には、これより多くの記録が観測されている。

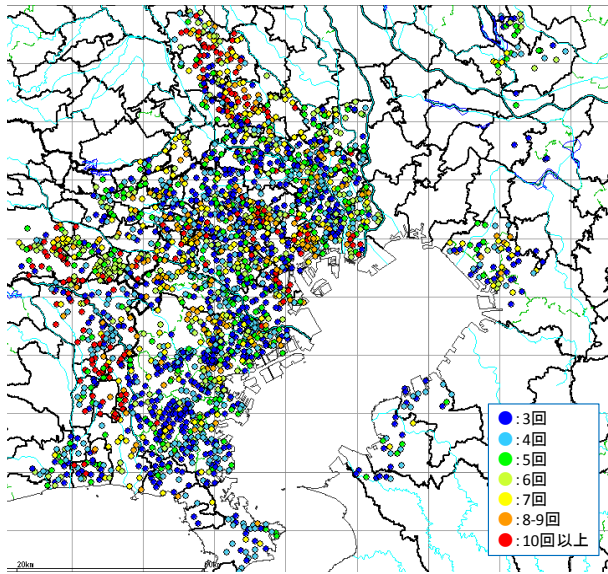


図-1 観測地震数

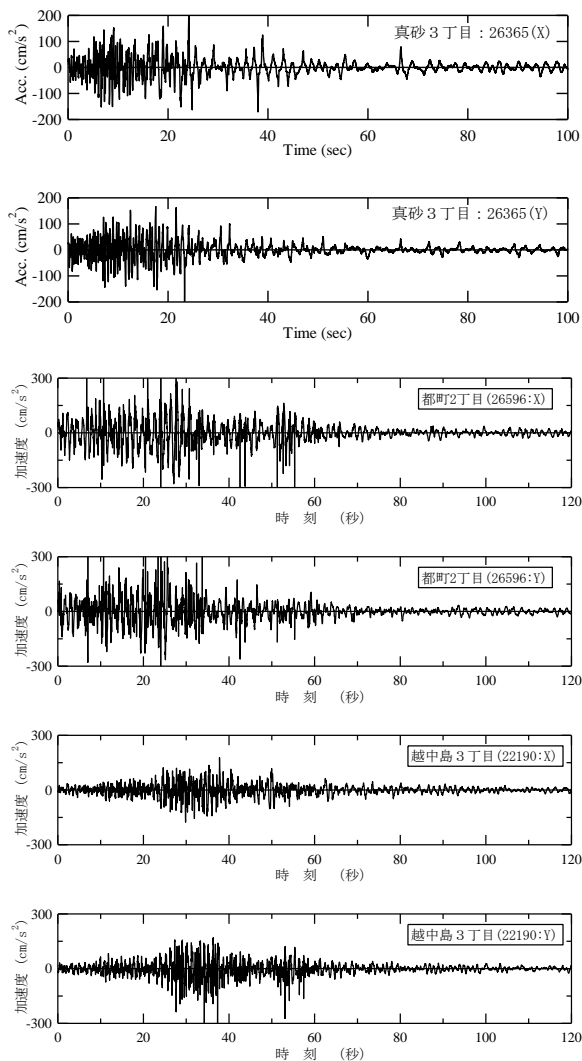


図-2 2011年東北地方太平洋沖地震での観測波形例

2011年東北地方太平洋沖地震の本震についても、3000点以上で波形記録を収集できており、余震記録も多く得られている。加速度波形の例を図-2に示す。一番上の波は液化化の様相を示しているなど、観測点により大きく振幅や経時特性が異なることが分かる。

### 3. SI値増幅度の算出手順

地震観測記録から表層地盤による増幅度を算出する手法としては、岩盤がほぼ露頭しているような観測点を基準点とするのが最も標準的なものである。東京ガス観測点でそこまで地盤条件を確認できなくても、横浜市の iz02 など他機関のデータを用いることも考えられる。横浜市内のみであれば、iz02 を用いることができるが<sup>3)</sup>、さいたま市や千葉市など数十 km も離れると距離減衰の差異を無視できなくなる。そこで、関東地方周辺に展開する防災科学技術研究所の K-NET のデータで距離減衰式を構築し、これに対する増幅度を算出することが考えられる。その具体的な手順は、図-3 に示すように、新 SI センサー観測値を用いて、K-NET 観測記録の距離減衰式から新 SI センサー観測点の SI 値増幅度を算出するものである。①～⑤の手順で得られる地震毎の SI 値増幅度の内、適切な地震についての平均値を SI 値増幅度とする。

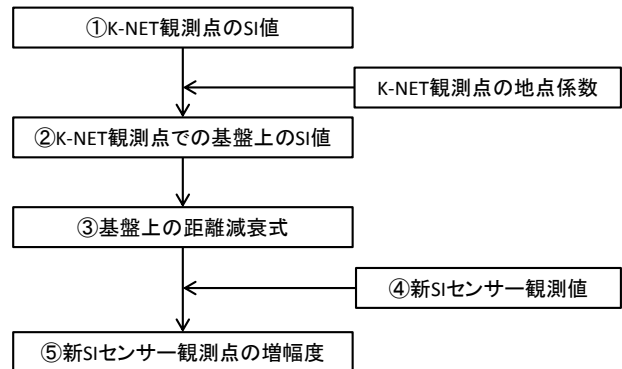


図-3 SI 値増幅度の算出手順

#### ①K-NET 観測点の観測値

新 SI センサー観測点で記録が得られている内の対象地震について、関東地区の(独)防災科学技術研究所による強震観測網 (K-NET) 観測点(115 地点)における観測記録から SI 値を算出する。図-4 に○で示す。

#### ②K-NET 観測点での基盤上の SI 値

K-NET 各点の SI 値増幅度で地表観測 SI 値を除することにより、基盤上の SI 値を算出する。図-2 において、○→●に対応する。K-NET 各点の SI 値増幅度として、Shabestari & Yamazaki が K-NET 観測記録を用いて回帰分析により算出した地点係数を用いる(図-5)。東京山梨県境付近に堅い岩盤上の観測点が多い。なお、文献での地点係数は全国の平均値が 0 になるように定めている。本論文では、工学的

基盤相当の AVS20=600m/s に対応する SI 値増幅度となるように 0.25 を Shabestari & Yamazaki での地点係数  $c_i$  に加え、

$$\alpha_{SI} = 10^{c_i r^{0.25}} \quad (1)$$

を K-NET 各点の SI 値増幅度とする。

### ③ 基盤上の距離減衰式

②で得られた基盤上の観測値  $SI_B$  に対し、地震毎に震源距離  $r$ (km)のみを説明変数として、回帰を行い、距離減衰式を作成する。図-4 の●を用いて、実線を作成することに対応する。

$$\log_{10}(SI_B) = b_0 + b_1 r - \log_{10} r \quad (2)$$

### ④ 新 SI センサー観測値

新 SI センサーによる時刻歴観測記録から SI 値を再計算する。図-4 の△に対応する。

### ⑤ 新 SI センサー観測点の増幅度

③で作成した距離減衰式に対する新 SI センサー観測値の増幅度を求める。図-4 の△を実線で除す。

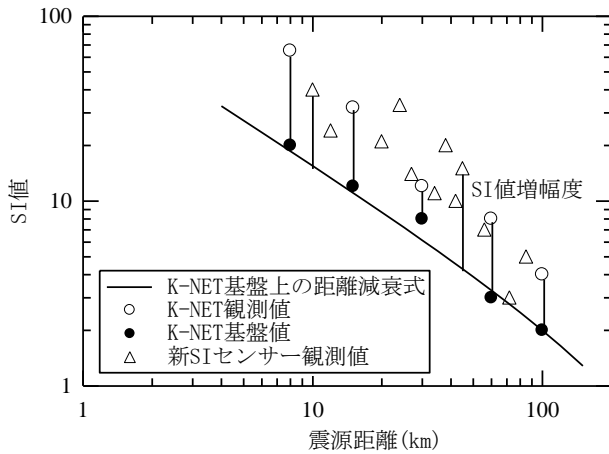


図-4 SI 値増幅度評価の考え方

## 4. 地震毎のSI値増幅度の算出

### (1) 基盤上の距離減衰式

②③のステップで、K-NET 観測記録の回帰分析によって得られた距離減衰式と観測値の例を図-6 に示す。

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域は、およそ長さ 450km、幅 150km の巨大なものであるため、点震源とした震源距離を用いたことで、誤差を大きくしている可能性がある。そこで、断層最短距離を算出すると共に、司・翠川(1994)に基づき定数項を加えた次式で回帰分析を行った。なお、モーメントマグニチュード  $M_w$  については、内閣府により、司・翠川式では、 $M_w=9.0$  でなく、 $M_w=8.3$  程度を入力すると、観測値と整合すると指摘されているので、ここでも  $M_w=8.3$  を用いた。

$$\log_{10}(SI_B) = b_0 + b_1 r - \log_{10} r (r + 0.028 \times 10^{0.5 M_w}) \quad (3)$$

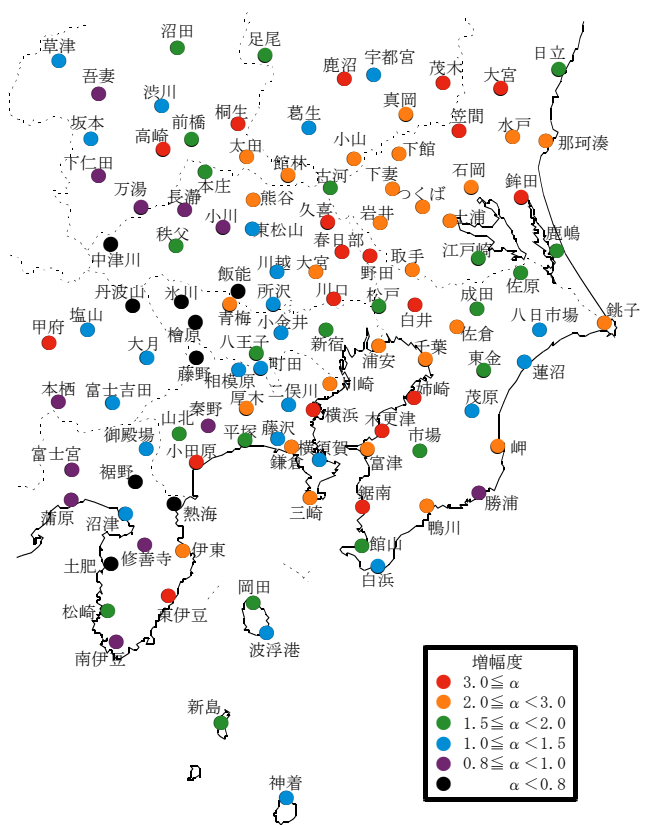
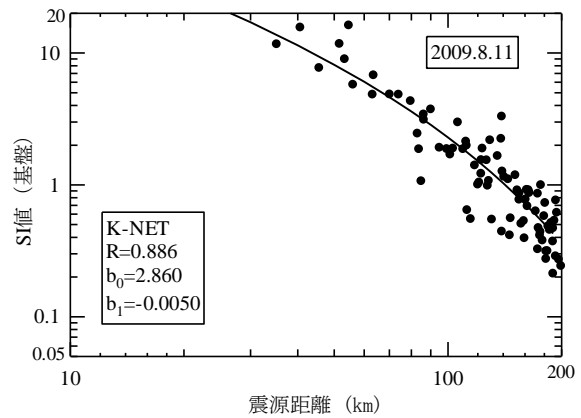
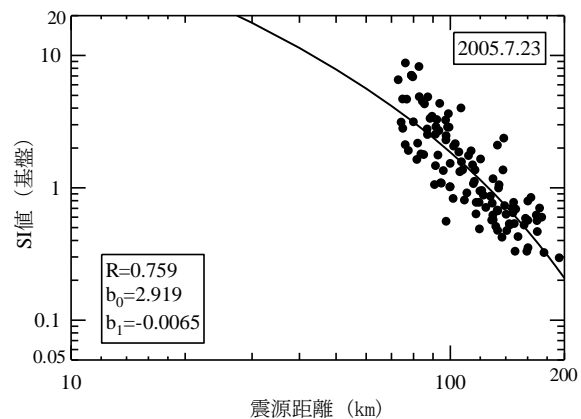


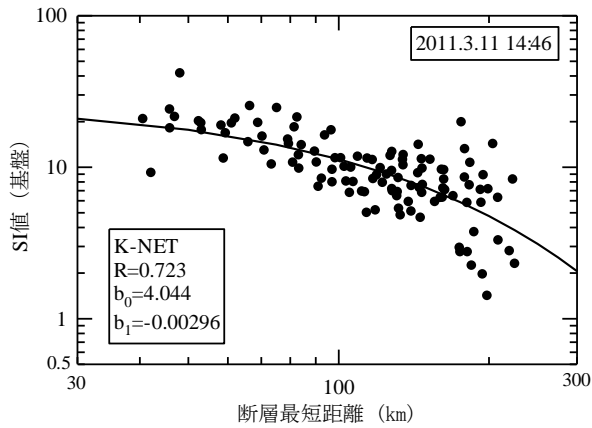
図-5 K-NET 観測点における SI 値増幅度 (Shabestari & Yamazaki)



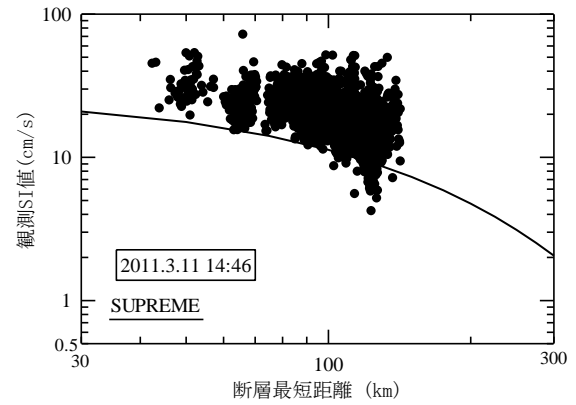
(1)2009.8.11 駿河湾の地震



(2)2005.7.23 千葉県北西部の地震



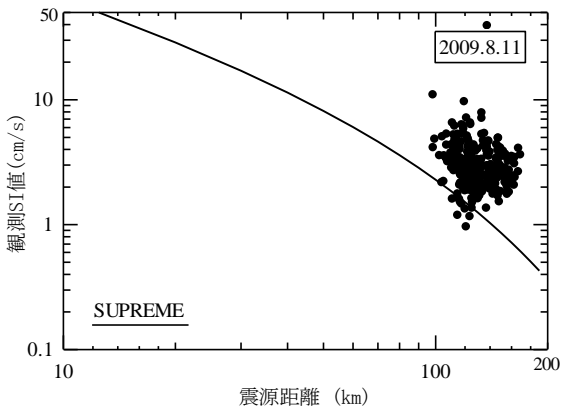
(3)2011.3.11 東北地方太平洋沖地震  
図-6 K-NET 観測 SI 値 (基盤) の距離減衰特性



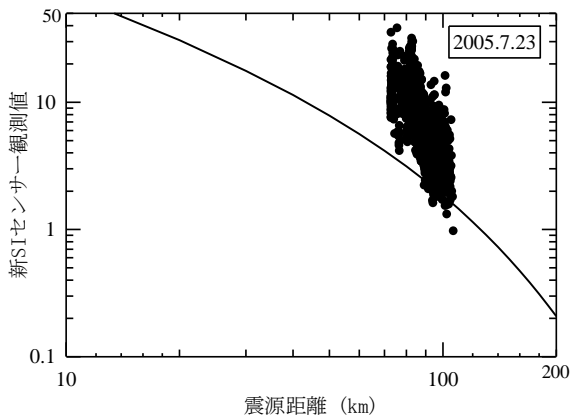
(3)2011.3.11 東北地方太平洋沖地震  
図-7 新 SI センサー観測値と距離減衰式

(2) SUPREME観測値

K-NET による基盤上の距離減衰式と SUPREME での観測 SI 値の関係を例と同様に図-7 に示す。SUPREME の観測値の震源距離の幅は狭く、一方で同じ距離でも値は大きく異なっているのので、SUPREME 観測値からの距離減衰構築は容易でないことが分かる。



(1)2009.8.11 駿河湾の地震



(2)2005.7.23 千葉県北西部の地震

(3) SI値増幅度

図-1 に示した、3 地震以上を観測している 2185 点で観測地震での平均値である SI 値増幅度を算出した。その分布を図-8 に示す。江東区～足立区の東部低地で意外と小さく、中央区～新宿区の中心部の方が大きい。三鷹市付近以西では小さくなっている。また、横浜市で揺れやすさ係数が大きい地点が多い。

図-9～11 にエリア毎に拡大して、揺れやすさ係数の分布を示す。

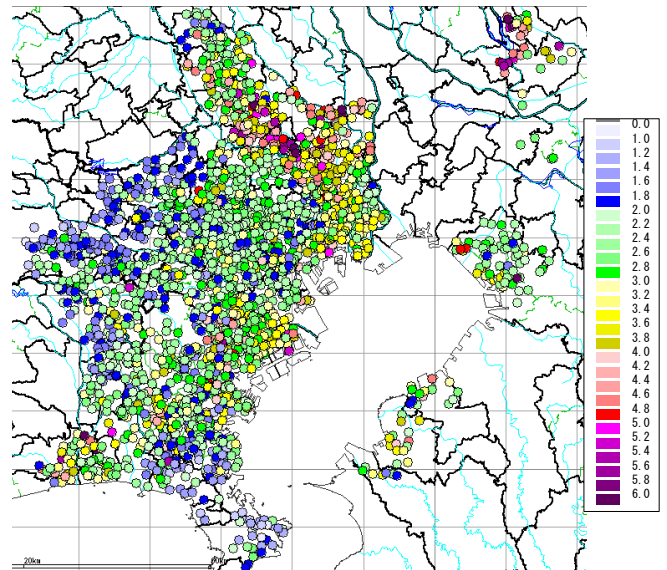


図-8 SI 値増幅度 (観測点での平均値)

○東京都東部 (図-9)

八潮市、足立区、三郷市など東部低地の北の方で、揺れやすさ係数が 3.0 を越える箇所が多い。荒川河口付近の方が表層は厚くなるが、必ずしも揺れやすさ係数は大きくなっていない。



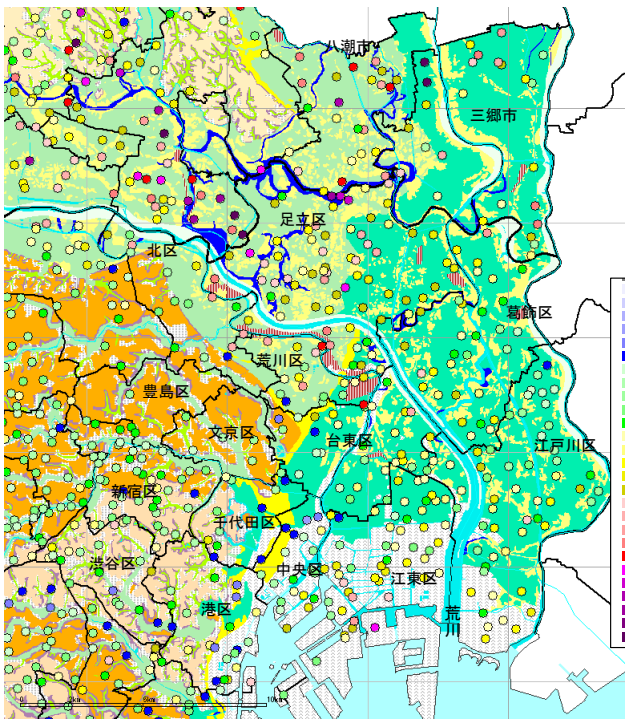


図-9 揺れやすさ係数の分布（東京都東部）

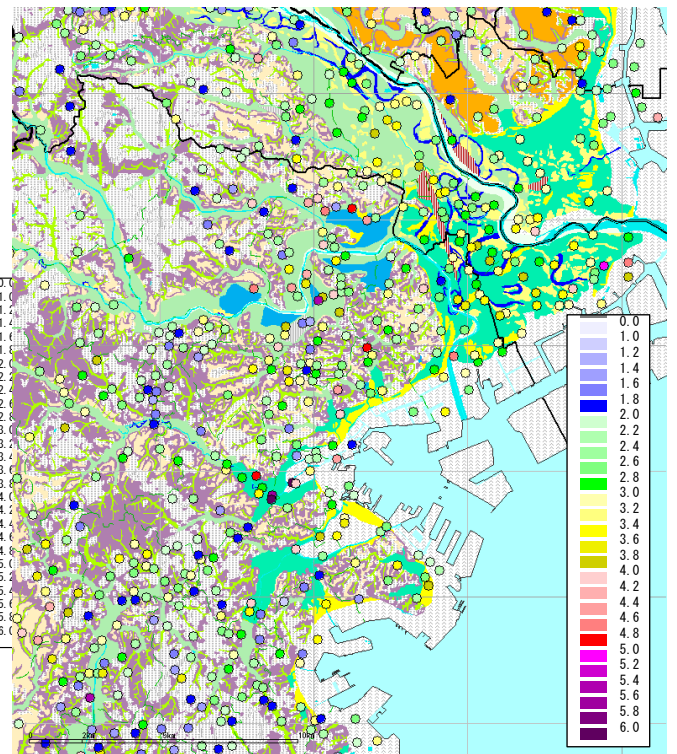


図-11 揺れやすさ係数の分布（横浜市・川崎市）

○東京都多摩地域（図-10）

区部西部と同様であるが、台地・段丘でも、武蔵野面（オレンジ）よりも立川面（朱色）の方が、揺れやすさ係数が2.0を下回るところが多い。

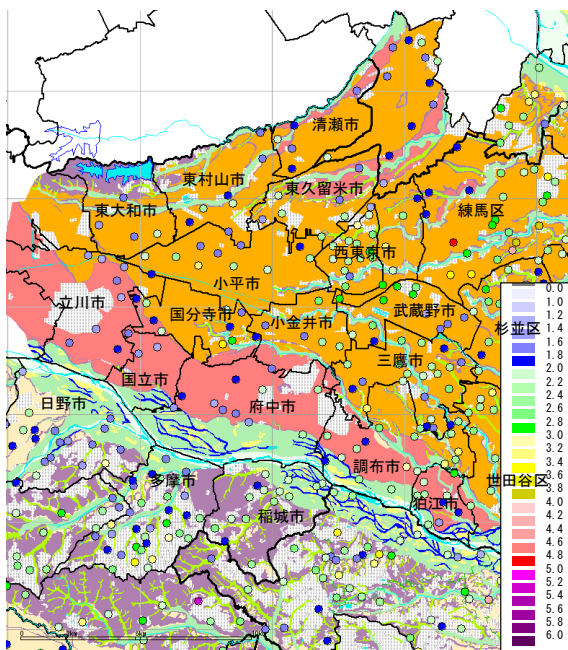


図-10 揺れやすさ係数の分布（東京都多摩地域）

○横浜市・川崎市（図-11）

川崎市川崎区、横浜市西区、中区の海岸平野・埋立地の他、港北区の鶴見川周辺など軟弱地盤でSI値増幅度が3.0を越えている。

4. 地盤情報とSI値増幅度の関係

得られた SUPREME 観測点での SI 値増幅度と、観測点に該当する 50m メッシュの AVS20 との関係、地震毎に次式で回帰分析を行った。

$$\log_{10}(\alpha_{SI}) = a * \log_{10}(AVS20) + b \quad (4)$$

得られた結果を図-12 に破線で示す。現在、SUPREME で用いている田村・山崎式(2002)を青線で示す。また、本検討での各観測点の平均 SI 値増幅度で回帰した場合の結果を赤線で示す。両者の回帰係数の比較を表-1 に示す。地震毎の関係では、データが多い AVS20=150~250m/s ではいずれの地震でも同程度の値ではあるものの大きくばらついていたが、平均化した結果は概ね既往の結果と比較して妥当な値である。

東京ガス地質分類では、約 20 の分類がある。図-13 は地形分類毎に観測増幅度を示したものであり、赤丸（○）は平均値を示している。

表-1 揺れやすさ係数とAVS20の関係

	係数 a	切片 b
各点の揺れやすさ係数	-0.5939	1.757
田村・山崎式	-0.785	2.18

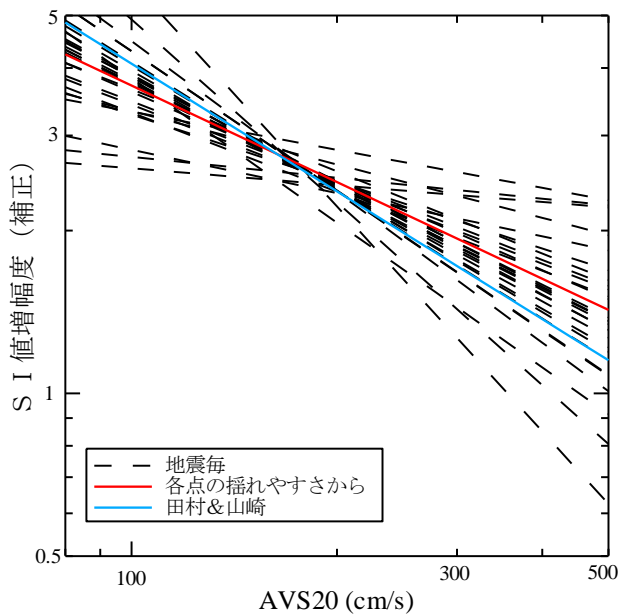


図-12 揺れやすさ係数と AVS20 の関係

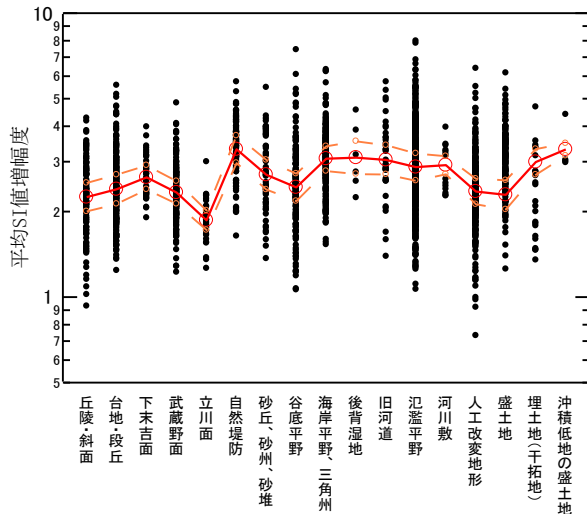


図-13 地形分類毎の観測点増幅度

## 5. おわりに

本論文では、東京ガスが約4,000点に設置している超高密度地震観測網で蓄積された記録を用いて、SI値増幅度の関する検討を行った。これにより、以

下のことが明らかになった。

- 1) K-NET観測記録で基盤上の距離減衰式を構築することにより、広域の観測点でのSI値増幅度を評価した。これを各観測点で平均値を算出した。
- 2) 得られた平均SI値増幅度と深さ20mまでの平均S波速度の関係、地形分類との関係の評価し、地盤が軟弱なほど揺れる傾向が得られた。

東京ガスの観測網は防災目的で構築されており、K-NETのように観測条件が統一されているものではない。今後、観測条件の確認、地震観測記録の追加も行った上で、地域毎の増幅度分布を算出し、より高精度の地震動分布推定を図る予定である。

本論文では、防災科学技術研究所K-NETのデータを使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 清水 善久, 石田 栄介, 磯山 龍二, 山崎 文雄, 小金丸 健一, 中山 渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.283-296, 2003.
- 2) 猪股 渉, 乗藤 雄基, 石田 栄介, 塚本 博之, 山崎 文雄: 東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度地震観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第2号 (特集号), pp.37-44, 2013.
- 3) Shabestari, K. T. and Yamazaki, F., Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.137-140, 1999年.
- 4) 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年
- 5) 内閣府中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」, 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 報告, 2011年.
- 6) 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, 第523号, pp.63-70, 1999年.

## SITE AMPLIFICATION FACTOR ESTIMATED WITH SUPER-DENSE ARRAY OBSERVATION IN CAPITAL REGION

Yuki NORITO, Wataru INOMATA, Iwao SUTOMI, Eisuke ISHIDA,  
Fumio YAMAZAKI and Takanobu SUZUKI

Many earthquake records are observed by the super-dense realtime monitoring system by Tokyo Gas. Amplification factors are estimated for over 3,000 sites using observed records for about ten years. Those show to be well correlated to average S-wave velocity.