

高密度な観測SI値に基づく 首都圏の揺れ易さの統計的な評価

乗藤 雄基¹・猪股 渉¹・末富 岩雄²・石田 栄介²・
山崎 文雄³・鈴木 崇伸⁴

¹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

²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

³千葉大学大学院 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

⁴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と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に、リアルタイム地震防災システム「SUPREME」を運用している¹⁾。これは、地震計が約4,000箇所に設置され、平均では0.9km²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・液化化危険度分布を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²⁾。

これは、多数の地震計を設置したことでその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。そのためには、基盤でのSI値が必要となる。猪股ら³⁾では、2011年東北地方太平洋沖地震では深さ20mに設置されているMeso-netの記録を利用可能であることから、これを基盤地震動としてSI値増幅度を算出した結果に基づき、地盤分類との関係や、平均S波速度および簡易地盤モデルに基づく理論伝達関数との関係について検討した。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100以上の地震での観測記録を活用し、地震観測点毎に平均的なSI値増幅度を算出する。基盤地震動は広域の観測網を有し、多くの地震の観測データが蓄積・公開されているK-NETの記録から算出する。このように、基盤地震動の算出方法などは猪股ら³⁾と異なるアプローチをとり、複数のアプローチから得られた知見に基づき、現在用いている50mメッシュのSI値増幅度の高精度化など今後の防

災対策検討への活用を考えるものである。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との関係など、現行の手法との比較等についても検討する。

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(なお分布図は、すべて上を北として示す)。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1.0cm/sを越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。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。一番上の波は液状化の様相を示しているなど、観測点により振幅や経時特性が大きく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、ほぼ岩盤露頭と見なせる泉区の観測点(iz02)を用いることができるが⁴⁾、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。

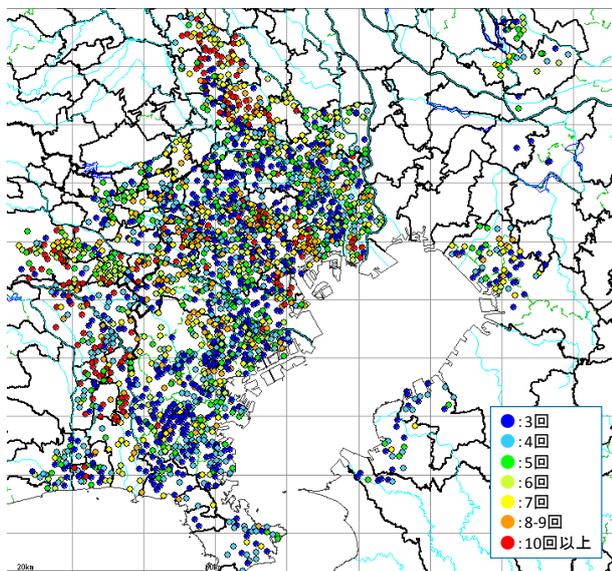


図-1 観測地震数

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のデータで基盤上におけるSI値の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。

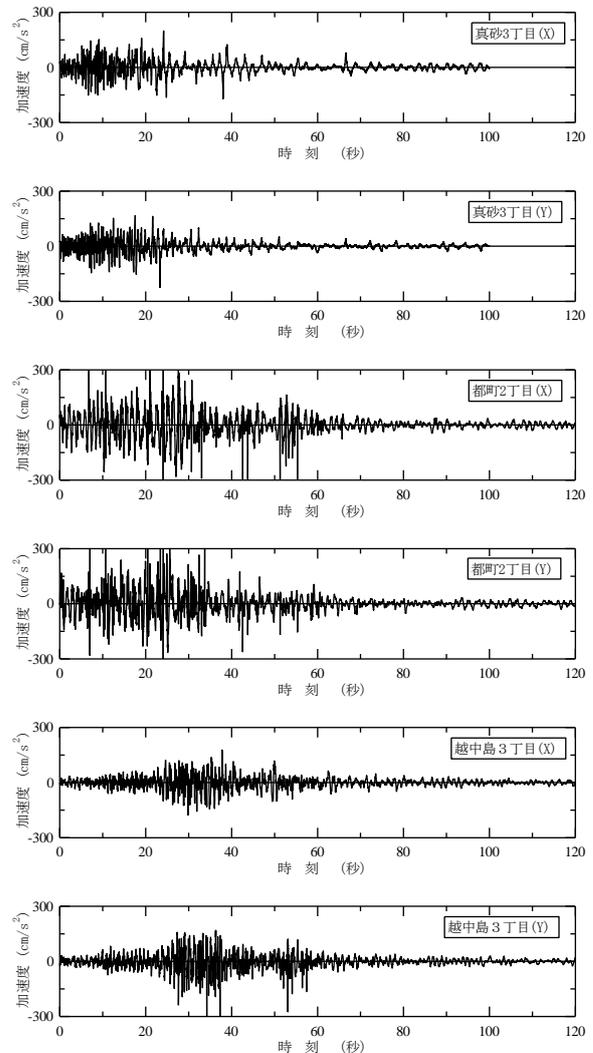


図-2 2011年東北地方太平洋沖地震での観測波形例

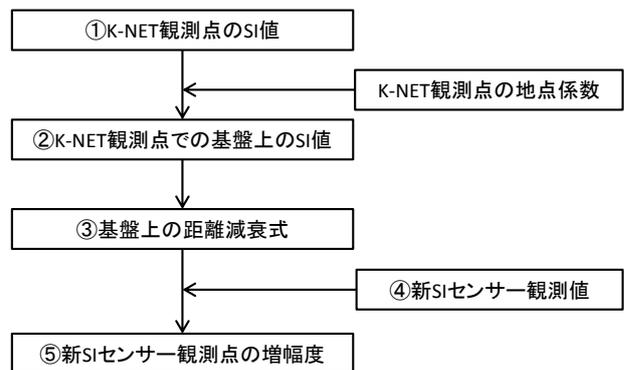


図-3 SI値増幅度の算出手順

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(SI_B)を算出する。図-4 において、○から●へ下げることに対応する。K-NET 各点の SI 値増幅度として、Shabestari & Yamazaki⁹⁾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 になるように定めたものである。本論文では、工学的基盤相当の AVS20=600m/s に対応する SI 値増幅度が必要になるので、この値で増幅度が 1.0 となるように 0.25 を Shabestari & Yamazaki での地点係数 c_i に加え、

$$\alpha = 10^{c_i + 0.25} \quad (1)$$

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 SI 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。

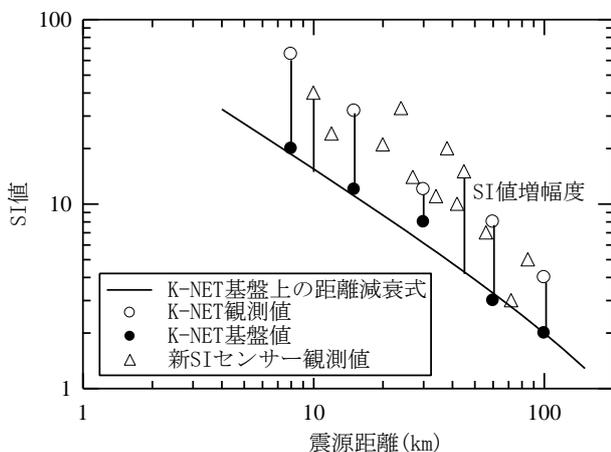


図-4 SI 値増幅度評価の考え方

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ので、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(1999)⁶⁾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⁷⁾ので、ここでも $M_w=8.3$ を用いた。

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

(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 値の関係の例を同様に図-7 に示す。観測 SI 値は増幅を含むものであるので、概ね距離減衰式より大きな値となっている。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ため、SUPREME 観測値のみからの距離減衰構築は容易でなく、K-NET 観測値を用いたことで SUPREME 観測値とも矛盾しない距離減衰式を算出できていることが分かる。

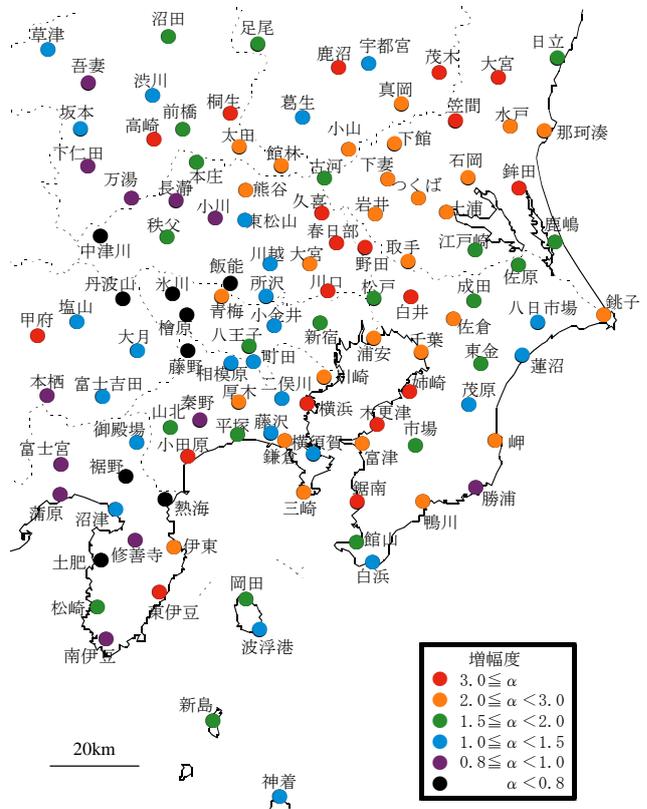
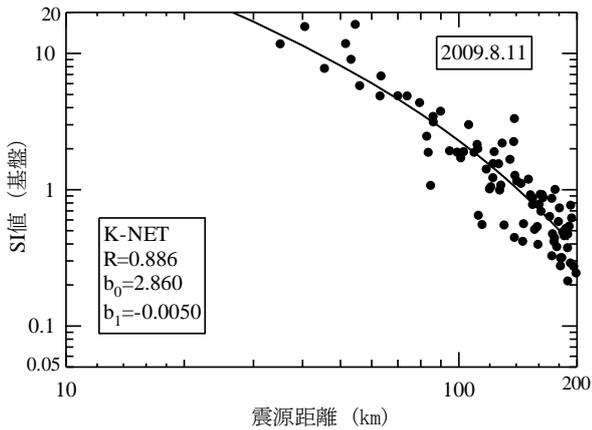
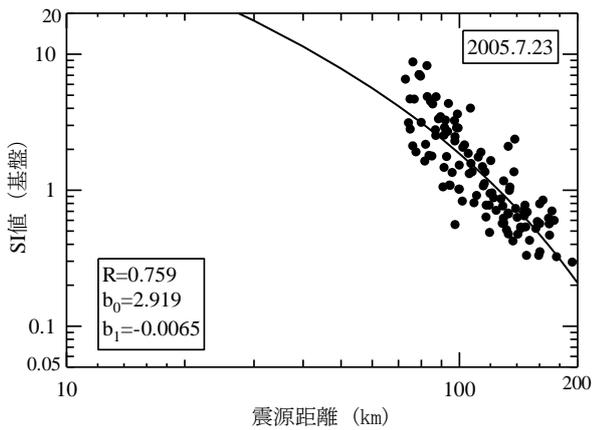


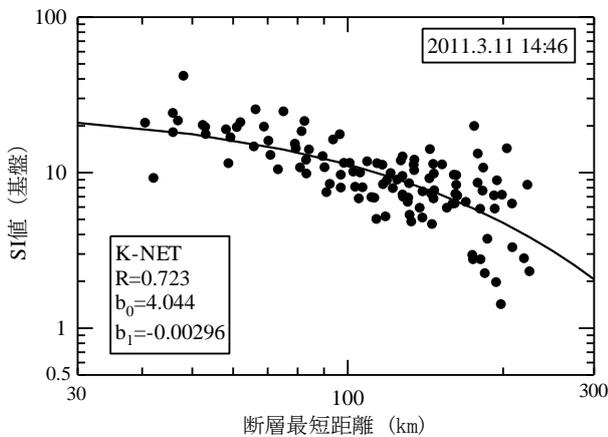
図-5 K-NET 観測点における SI 値増幅度 (式(1)で 0.25 の補正を加える前⁵⁾)



(1)2009.8.11 駿河湾の地震

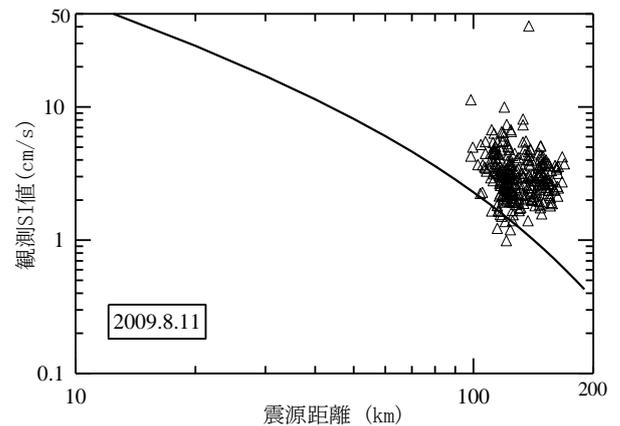


(2)2005.7.23 千葉県北西部の地震

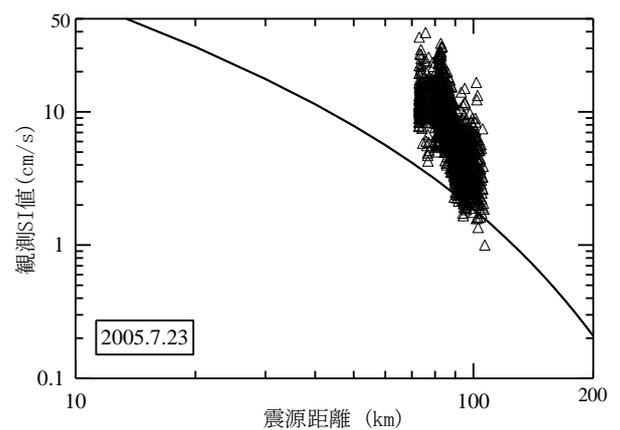


(3)2011.3.11 東北地方太平洋沖地震

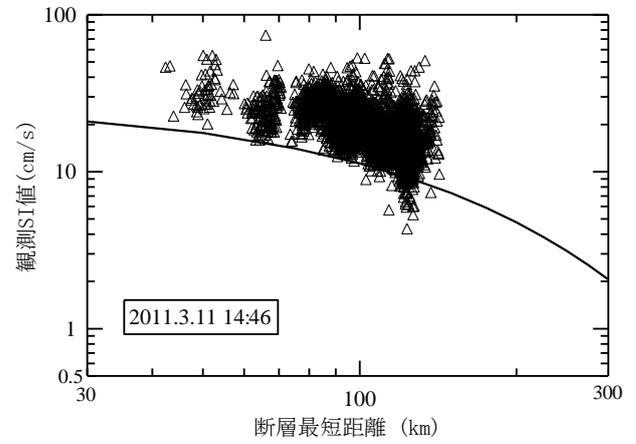
図-6 K-NET 観測 SI 値 (基盤) の距離減衰特性



(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-7 新 SI センサー観測値と距離減衰式

(3)揺れやすさ係数

図-1 に示した、3 地震以上を観測している 2185 点で観測地震毎の SI 値増幅度の平均値 (以下、地震毎の値と区別するため、揺れやすさ係数と記す) 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。背景は、地質分類である。

○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。

○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 を下回る場所が多い。

○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)⁸⁾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。

破線で示した地震毎に回帰分析を行った関係では大きくばらついていたが(ただしデータが多い AVS20=150~250m/s ではいずれの地震でも同程度の値), 各点での揺れやすさ係数(SI 値増幅度の平均値)を用いて回帰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。

丘陵でも, 最も古い立川面で揺れやすさ係数は小さい。SI 値増幅度の最大と最小の幅は, 地形分類によって異なるが, データ数が異なる影響が大きいためであり, 破線で示した標準偏差のばらつきは大きなものではない。低地では, 表層が薄い傾向にある「谷底平野」でやや小さく, 「砂丘, 砂州, 砂堆」も比較的締まった砂で構成されるので, 次いで小さくなっている。

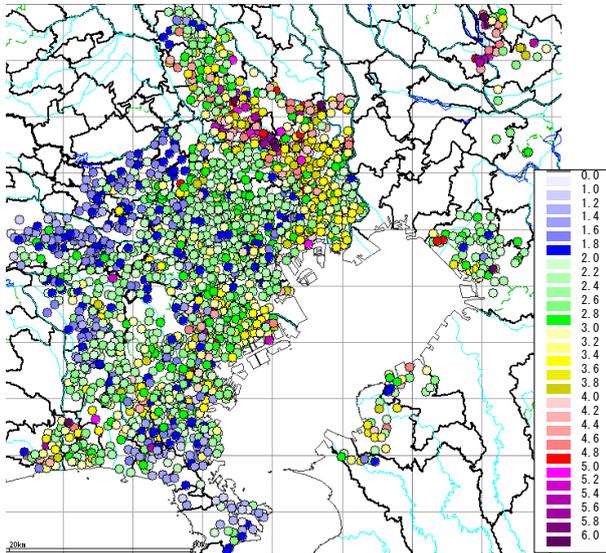


図-8 SI 値増幅度(観測点での平均値)

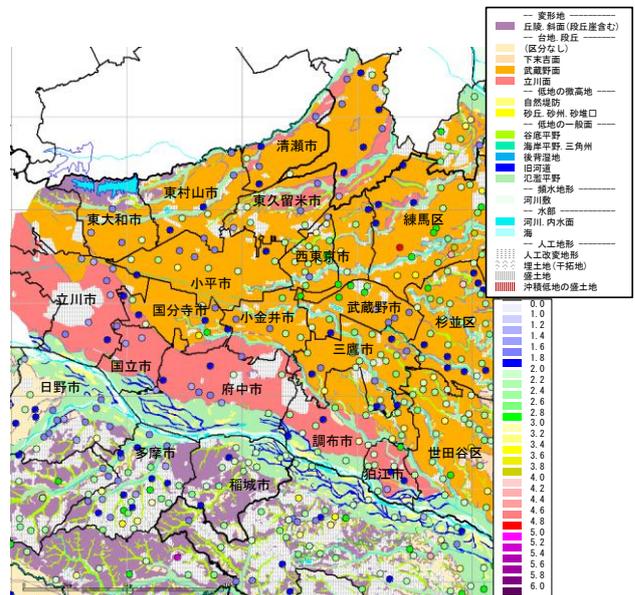


図-10 揺れやすさ係数の分布(東京都多摩地域)

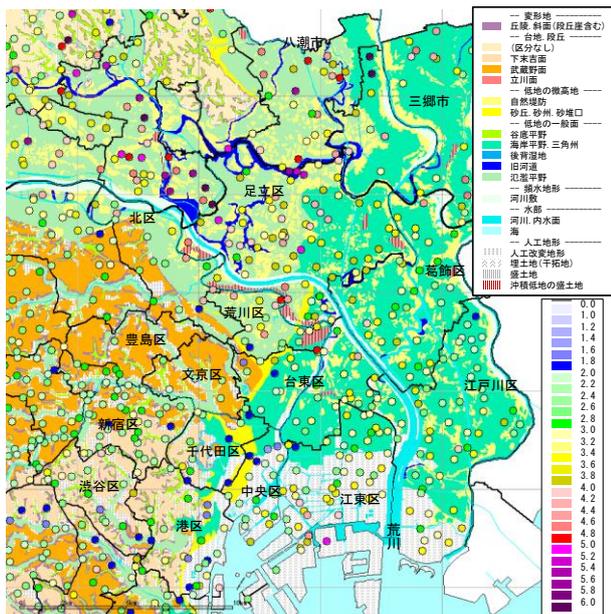


図-9 揺れやすさ係数の分布(東京都東部)

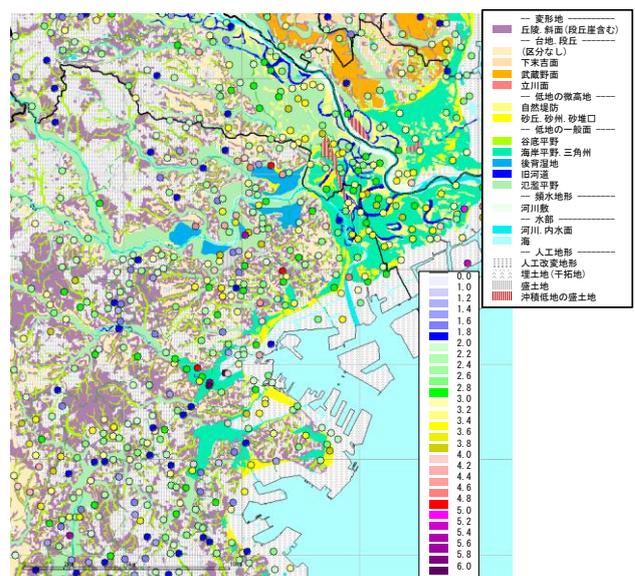


図-11 揺れやすさ係数の分布(横浜市・川崎市)

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	-0.594	1.76
田村・山崎式	-0.785	2.18

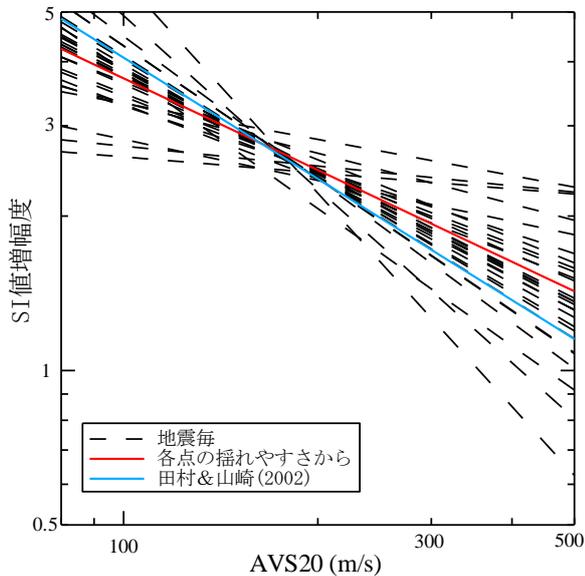


図-12 揺れやすさ係数と AVS20 の関係

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。各観測点でこれらの平均値を揺れやすさ係数として算出した。
- 2) 得られた揺れやすさ係数（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。

本論文で得られた揺れやすさ係数は、AVS20のような地盤指標では表現できない各観測点の局所的な増幅特性を反映したものである。これらの平均的な傾向は、AVS20との関係や地形分類との関係において既往の知見と矛盾しないことを確認した。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、猪股ら³⁾の別途検討の成果と合わせ、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。

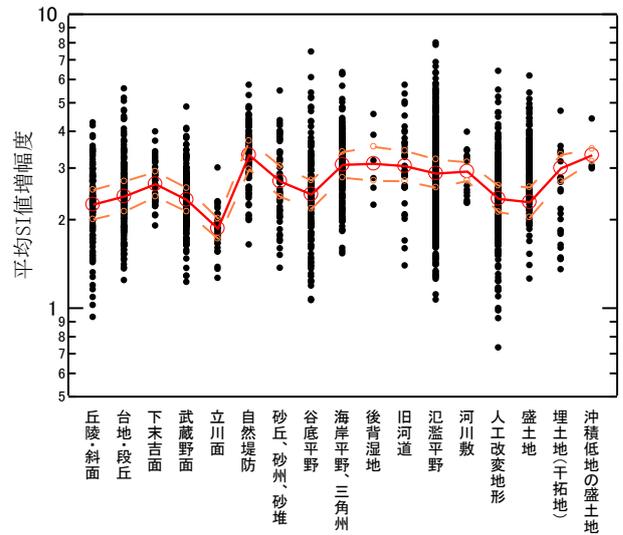


図-13 地形分類毎の観測点増幅度

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) 猪股 渉, 乗藤 雄基, 大田 肇士, 丸山 喜久: 高密度な地震観測記録を用いた地盤震動特性の評価, 第33回地震工学研究発表会講演論文集, 2013.
- 4) 末富 岩雄, 福島 康宏, 石田 栄介, 猪股 渉, 乗藤 雄基, 山崎 文雄, 鈴木 崇伸: 横浜市高密度アレー観測記録を用いた応答スペクトルの空間補間精度の検討, 土木学会論文集A1, 第68巻, 第4号, pp.126-137, 2012.
- 5) 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.
- 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.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2013. 11. 14受付, 2014. 1. 28修正, 2014. 2. 22受理)

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

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

Many earthquake records are observed by the super-dense realtime monitoring system, SUPREME, by Tokyo Gas Co., Ltd. Amplification factors are estimated for over 3,000 sites using observed records for about ten years. Observed SI values were gathered for the five minutes and the distribution map of SI values with 50m-meshes were calculated after ten minutes at the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Average amplification factors of SI values at observation sites are estimated by attenuation curves of observed earthquakes with K-NET records. Those show to be well correlated to average S-wave velocity in the upper 20m (AVS20) and geomorphologic classification.