

高密度な地震観測記録を用いた首都圏の広域地盤データの評価

Evaluation of the site amplification characteristics in Tokyo Metropolitan area using dense ground motion records

11TM0310 大田 肇士
Tadashi Ota

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

Tokyo Gas Co., Ltd. has deployed a real-time earthquake monitoring system, *SUPREME*, which employs approximately 4,000 spectrum intensity (SI) sensors in their service area. In the *SUPREME* system, a geographic information system (GIS) is installed to interpolate observed SI values. Tokyo Gas gathered approximately 60,000 borehole information, and the amplifications of SI are estimated in their service area. Recently, Metropolitan Seismic Observation network (MeSO-net) has been operated, and the ground motion records at the bottom of 20 m deep boreholes are observed in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. This study evaluates the site amplification characteristics using the ground motion records obtained by *SUPREME* and MeSO-net, and the availability of geospatial data compiled by Tokyo Gas is discussed.

1. はじめに

東京ガス(株)では、2001 年から *SUPREME* (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake)と呼ばれる新防災システムを導入し、高密度に配備された地震計(新 SI センサー)により観測された地震記録をもとに、地区ガバナ単位でガス供給を自動的に停止する仕組みを構築した¹⁾。現在では、供給エリア内の地区ガバナ(整圧器)約 4000 箇所に、SI センサーの配備が行われている。*SUPREME* の観測密度は極めて高いが、センサーのない地域については地震動補間を行い、地震動強さの空間分布を把握する機能を有している。地震動の補間の際には、約 6 万本のボーリングデータと地質分類図をもとにして作成された 50m メッシュの広域な表層地盤データが用いられている²⁾。

SUPREME が搭載している地盤モデルの SI 値増幅率は、深さ 20m までの平均 S 波速度 (AVS20) をパラメータとして推定されている³⁾。*SUPREME* が稼働を開始してから 10 年以上が経過し、観測記録が蓄積されてきた。さらに、2005 年千葉県北西部地震のような首都圏に震源を有する地震、2011 年東北地方太平洋沖地震のような遠地で発生したマグニチュードの大きな地震など、様々な震源タイプの地震記録が得られている。

そこで、本研究では、高密度に観測された地震記録を用いて、*SUPREME* が搭載している地盤モデルの評価を行うことを目的とする。まず、駿河湾地震(2009 年 8 月 11 日)、千葉県北西部地震(2005 年 7 月 23 日)、東北地方太平洋沖地震(2011 年 3 月 11 日)について、東京 23 区の地表面 SI 値の分布を広域地盤データを用いて推定する。推定結果と *SUPREME* 等の地震計で実際に観測された SI 値分布の比較を行い、広域地盤データの SI 値増幅率の妥当性について検討を行う。また、東北地方太平洋沖地震とその余震について、*SUPREME* によって高密度に観測された地表面地震記録と、首都圏地震観測網 (MeSO-net)⁴⁾で得られた地中地震記録を比較し、表層地盤の増幅特性を推定した。*SUPREME* に搭載されている広域地盤データの *AVS20* にもとづき地盤の固有周期を推定し、観測記録から推定される固有周期と比較した。さらに、広域地盤データから一次元

地盤モデルを作成し地盤震動解析を行い、S 波伝達関数と観測記録の地中—地表間のフーリエ振幅比を比較した。

2. 地盤増幅率を用いた東京 23 区内の SI 値分布の推定

(1) 地表面 SI 値分布の推定方法

地表面で観測される SI 値 (SI_s) は、以下の式で表わされるものと仮定する。

$$SI_s = SI_b \times AR \quad (1)$$

ここで、 SI_b は工学的基盤における SI 値、 AR は表層地盤の SI 値の増幅率である。 SI_s の東京 23 区内における分布を評価するには、 SI_b と AR の分布を仮定することが必要となる。

工学的基盤における SI 値 (SI_b) のばらつきの評価は、地震ハザードステーション (J-SHIS) の方法⁵⁾を参考にした。J-SHIS では、工学的基盤における最大速度 (PGV) を司・翠川の距離減衰式⁶⁾で求め、工学的基盤における最大速度のばらつきの分布形状を対数正規分布と仮定している⁵⁾。そこで、本研究では、K-NET、KiK-net、*SUPREME* で観測された SI 値を、J-SHIS で公開されている地盤増幅率^{7), 8)}、*SUPREME* が搭載する地盤増幅率³⁾を用いて工学的基盤に割り戻す。回帰分析によって距離減衰式を構築し、そのばらつきが対数正規分布に従うものと仮定する。なお、工学的基盤は S 波速度 600m/s の地層としている。

工学的基盤における SI 値の分布形状が対数正規分布でモデル化できることをふまえると、地盤増幅率の 23 区内のばらつきも対数正規分布を仮定できれば数学的に扱いやすくなる。そこで、*SUPREME* に搭載されている地盤データから推定される地盤増幅率を 23 区内のものに整理し、確率紙上の最小二乗法⁷⁾によって対数平均と対数標準偏差を求めた。最小二乗法による決定係数 ($R^2=0.95$) も高く、地盤増幅率の空間的な分布を対数正規分布でモデル化することはある程度妥当であるものと考えられる。

このように、 SI_b 、 AR とともにばらつきが対数正規分布でモデル化できることをふまえると、式(1)より、地表面 SI 値も対数正規分布となる。なお、地表面 SI 値の対数平均 μ_s

と対数標準偏差 σ_s は、以下のような関係式が成り立つ。

$$\mu_s = \mu_b + \mu_{AR} \quad (2)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_b^2 + \sigma_{AR}^2 \quad (3)$$

ここで、 μ_b 、 σ_b は工学的基盤における SI 値の対数平均、対数標準偏差、 μ_{AR} 、 σ_{AR} は東京 23 区内の地盤増幅率の対数平均、対数標準偏差を表す。

(2) 東京 23 区の SI 値分布のばらつきの評価

本研究の推定方法が妥当であるか検討を行う。東京 23 区を対象とし、式(2)、(3)で推定される地表面 SI 値の対数正規分布の累積確率分布と実際の SUPREME 観測値の累積相対度数を比較する。図-1 に、2011 年東北地方太平洋沖地震、2009 年駿河湾沖の地震、2005 年千葉県北西部地震における工学的基盤における SI 値の距離減衰特性を示す。また、それぞれの地震について式(4)によって得られる標準偏差 σ_b も併せて示している。

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \log_{10} \left(\frac{SI_{b,i}}{SI_{m,i}} \right)^2} \quad (4)$$

ここで、 $SI_{b,i}$ は観測点 i の基盤 SI 値、 $SI_{m,i}$ は観測点 i における距離減衰式による予測値、 n はデータ数を表す。いずれの地震においても標準偏差は 0.2 程度の値を示した。なお、東北地方太平洋沖地震と駿河湾沖の地震については、国土院が作成した断層モデル^{8), 9)}から各観測点の断層最短距離を算出している。千葉県北西部地震については、マグニチュードも小さいことから点震源を仮定している。

以上の結果をふまえて、東京 23 区における地表面 SI 値の分布を予測する。各地震における東京 23 区の重心点の断層最短距離と距離減衰式を用いて工学的基盤における SI 値の平均値を定める。さらに、図-1 に示した標準偏差を用いて、ばらつきの分布形状を対数正規分布と仮定する。これに東京 23 区の SI 値増幅率を対数正規分布でモデル化したものを乗じて、地表面 SI 値の分布形状を推定した。結果を図-2 に示す。図中には、SUPREME 観測値の累積相対度数も併せて示している。千葉県北西部地震、駿河湾沖の地震に関しては、本研究の推定結果は SUPREME 観測値の分布をよく再現できている。東北地方太平洋沖地震に関しては、平均値は精度良く再現できている（観測値の平均：21.2cm/s、推定値の平均：22.5cm/s）が、ほかの 2 地震と比べると分布の推定精度は低下している。このことから、SUPREME に搭載されている地盤データの SI 値増幅率は、千葉県北西部地震、駿河湾沖の地震の際の広域増幅特性を比較的精度よく再現できていたものと考えられる。一方、東北地方太平洋沖地震の際の再現性に関しては、他のデータを用いて多角的な検討を行う必要があるものと考えられ、次章にて検討を行う。

3. MeSO-net 観測記録を用いた地盤増幅特性の検討

首都圏地震観測網（MeSO-net）で得られた地中観測記録（深さ 20m）と地表面地震記録を比較し、東北地方太平洋沖地震の本震および余震における表層地盤の増幅特性を推定した。東京都では、東京都震災対策条例の規定に基づき、地域危険度測定調査を概ね 5 年ごとに行っているが、本研究ではこれに用いられている地盤分類¹⁰⁾ごとに推定される増幅特性の結果を評価する。増幅特性の評価には、地盤分類ごとに MeSO-net 観測点とその周辺にある SUPREME 観測点の地震記録を用いて 2 点間の伝達関数、フーリエ振幅比、速度応答スペクトル比を算出する。さらに、速度応

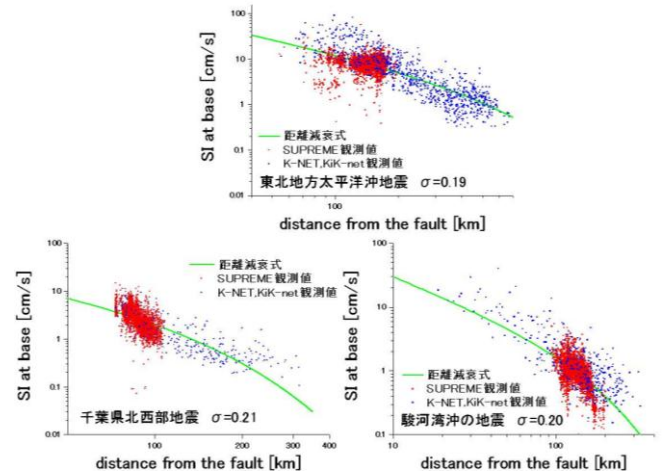


図-1 工学的基盤における SI 値の距離減衰特性と標準偏差

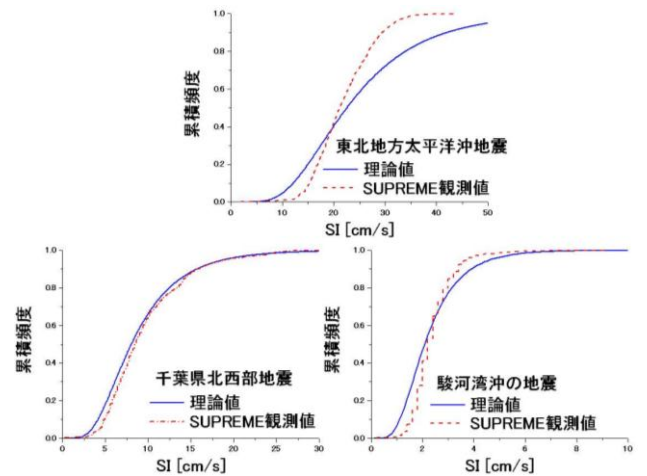


図-2 東京 23 区の地表面 SI 値の推定結果と SUPREME 観測値の累積相対度数の比較

答スペクトル比の卓越周期と SUPREME に搭載されている AVS20 から推定される卓越周期を比較し、広域地盤モデルの妥当性について地震観測記録を用いて評価する。

(1) 伝達関数を用いた検討

MeSO-net の地震計の地震記録（入力）を x 、SUPREME の地震計の地震記録（出力）を y とした場合の伝達関数 $H(f)$ は、以下の式で表わされる。

$$H(f) = S_{yy}(f) / S_{xx}(f) \quad (5)$$

ここで、 $S_{xx}(f)$ 、 $S_{yy}(f)$ はそれぞれバンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウを用いて平滑化したパワースペクトルとクロススペクトルである¹¹⁾。

MeSO-net の観測記録は方位ごとに得られるが、SUPREME の水平 2 成分の記録の方向は厳密には不明である。本研究では、検討に使用した観測点間距離が短いことをふまえて、水平 2 成分を合成した最大速度の方向が両者でほぼ等しいものと仮定し、SUPREME の観測記録を回転させた。

(2) フーリエ振幅比を用いた検討

MeSO-net と SUPREME で観測された加速度波形をフーリエ変換し、振幅の水平 2 成分合成値を算出する。算出されたフーリエ振幅の比を算出して、表層地盤の増幅特性を推定する。ここで、フーリエスペクトルにはバンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウ¹²⁾を施し、平滑化する。

(3) 速度応答スペクトルの振幅比と卓越周期

MeSO-net と SUPREME の速度応答スペクトル比を算出する．減衰定数は 5%とし，水平 2 成分をベクトル合成した速度応答スペクトルを使用する．

速度応答スペクトル比の卓越周期 T_{sv} を次式で推定する．

$$T_{sv} = \int R_{sv}(T) T dT / \int R_{sv}(T) dT \quad (6)$$

ここで， R_{sv} は速度応答スペクトル比を表し， T は応答スペクトルの計算に用いた周期である．式(6)を計算する際には，丘陵地と台地は周期 T を 0.1 秒から 1.0 秒，沖積低地では周期 T を 0.1 秒から 5.0 秒の間と定めた．

(4) 地盤分類ごとの各振幅比の比較

図-3，図-4 は，丘陵と沖積低地 5 に設置されている SUPREME 観測点と MeSO-net 観測点間の伝達関数の振幅，フーリエ振幅比，速度応答スペクトル比である．3 者の周期に対する振幅形状は比較的良好に似ており，表層地盤の卓越周期の推定に有用であると考えられるが，式(5)から得られる伝達関数の振幅は，フーリエ振幅比や応答スペクトル比と比べて小さい周期帯がある．これは，地中地震波に表面波などの散逸成分が多く含まれているため¹³⁾と考えられる．

図-5 は東京都地盤分類に設置されている SUPREME 観測点と MeSO-net 観測点における，本震の地震記録のスペクトル比から推定した卓越周期と SUPREME が搭載している広域地盤データの AVS20 を用いて 1/4 波長則から推定した地盤の卓越周期を比較している．

丘陵における結果（図-3，図-5）では，周期約 0.3-0.4 s に卓越周期が存在するものと推定される．AVS20 の値を用いた 1/4 波長則によって推定される卓越周期と式(6)から推定される周期を比較すると，図-3 の各振幅比で卓越している周期帯とほぼ一致している．

沖積低地 5 における結果（図-4，図-5）では，地震動のスペクトル比によると卓越周期は約 0.7-0.9 s 程度と推定される．図-5 によると，AVS20 から推定される地盤の卓越周期と地震動のスペクトル比から推定される卓越周期はあまり一致しない結果となった．また図-5 の丘陵と沖積低地 5 以外の地盤分類を見ると，沖積低地 5 と同様に AVS20 から推定される地盤の卓越周期と地震動のスペクトル比から推定される卓越周期は，とくに低地であり一致しない結果となった．

4. 一次元地盤震動解析を用いた地盤増幅特性の検討

(1) 一次元地盤モデルの作成

SUPREME に搭載されている広域地盤データには，AVS20 のほかに表層地盤の卓越周期に相当する特性値 (T_g)，および工学的基盤 (N 値 50 相当) までの深さ H_{Tg} も利用可能である．そこで，SUPREME 観測点でこれらの地盤情報を用いて，一次元地盤モデルを作成した． H_{Tg} が 20m より深い観測点では，図-6 のパターン 1 の地盤構造を仮定し，3 層系モデルの S 波伝達関数を推定した． H_{Tg} が 20m 以下の深さである観測点では，図-6 のパターン 2 の地盤構造を仮定し，2 層系モデルの S 波伝達関数を推定した．

(2) S 波伝達関数とフーリエ振幅比の比較

図-7 は丘陵と沖積低地 5 に設置されている，SUPREME 観測点と MeSO-net 観測点の東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて推定したフーリエ振幅比と，SUPREME 観測地の S 波伝達関数を比較したものである．丘陵における結

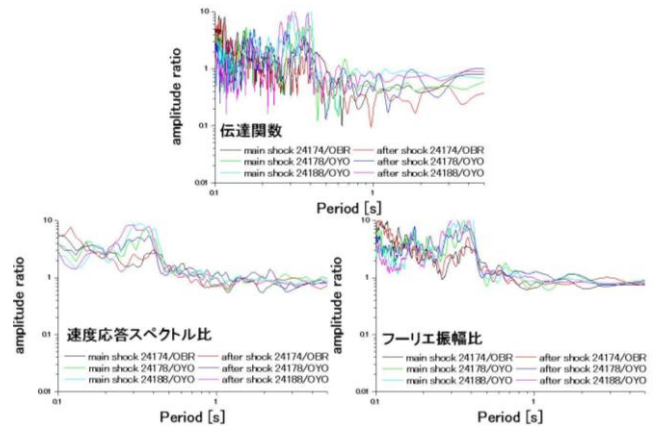


図-3 丘陵の SUPREME 観測点と MeSO-net 観測点の各振幅比の比較

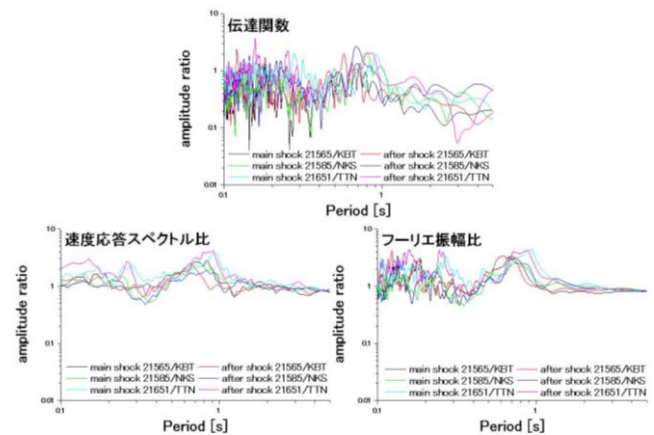


図-4 沖積低地 5 の SUPREME 観測点と MeSO-net 観測点の各振幅比の比較

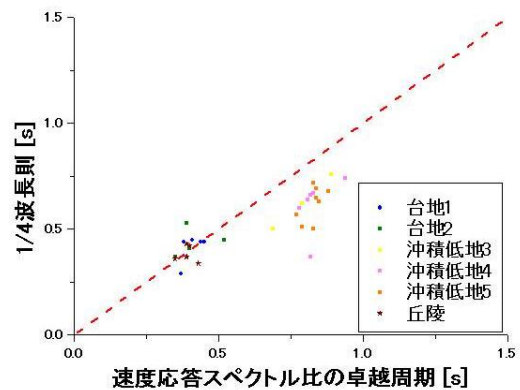


図-5 1/4 波長則と式 (6) の周期の関係

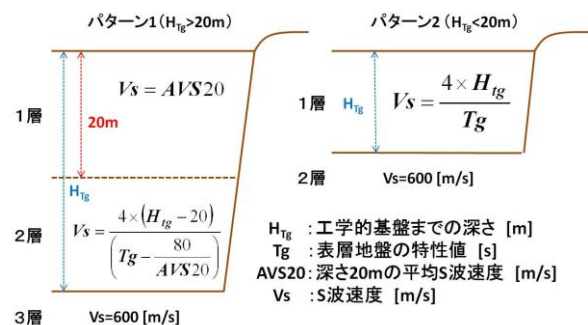


図-6 一次元地盤モデルの仮定

果では、フーリエ振幅比と伝達関数が似た形状となっており、卓越している周期もほぼ一致している。

沖積低地5における結果では、深さ20mの伝達関数はフーリエ振幅比とほぼ一致している。MeSO-netの地震計は深さ20mの地点に設置されているため、本研究で構築した地盤モデルの妥当性が示されたものと考えられる。一方、表層地盤の増幅特性は工学的基盤を基準に評価されるものであり、深さ H_{Tg} （約56.4m）に対する伝達関数に対応するものと考えられる。沖積低地では、 H_{Tg} が20mよりも深いことが多く、本研究の結果から20m以深の地盤データを利用して増幅特性を評価する必要性が高いことが示唆される。

(3) S波伝達関数と速度応答スペクトルの比較

図-8は丘陵と沖積低地5に設置されている、SUPREME観測点と周辺のMeSO-net観測点の東北地方太平洋沖地震の地震記録を用いて算出した速度応答スペクトル（5%減衰）と、SUPREME観測点のS波伝達関数を比較したものである。丘陵におけるSUPREME観測点の速度応答スペクトルは、周期0.36sと1.64s付近で振幅が大きく、周期0.36sはS波伝達関数の卓越している周期0.33sとほぼ一致する結果となった。周期1.64s程度で振幅が大きくなった原因は、東北地方太平洋沖地震はM9の巨大地震であるため、長周期成分が影響しているためと考えられる。

沖積低地5における結果では、深さ H_{Tg} を基準とするS波伝達関数の卓越している周期（約2秒）と速度応答スペクトルの振幅が最大になっている周期（約2-3秒）がほぼ一致する結果となった。また、深さ20mを基準とする伝達関数の卓越周期付近で、MeSO-netに対するSUPREME記録の増幅が確認できる。このことから、AVS20を用いる現在の方法では、深さ20m以深の地盤増幅特性が十分に評価されないことが考えられ、増幅率の推定精度向上にはこの点の改善が必要である。

5. まとめ

本研究は、SUPREMEが搭載する広域地盤データの妥当性について、首都圏で高密度に観測された地震記録を用いた検討を行った。2011年東北地方太平洋沖地震、2009年駿河湾沖の地震、2005年千葉県北西部地震について、工学的基盤におけるSI値のばらつきと地盤増幅率の空間分布に対数正規分布を仮定し、地表面SI値の分布を推定した。推定された東京23区の地表面SI値分布を実際の観測値の分布と比較したところ、千葉県北西部地震と駿河湾沖の地震に関しては精度よく再現された。このことから、SUPREMEの地盤データは、これらの地震の際の広域の増幅特性を比較的精度よく再現できていたものと考えられる。

一方、東北地方太平洋沖地震に関しては、推定結果と観測結果がやや乖離していた。このため、この地震の増幅特性を多角的に評価することを目的として、首都圏地震観測網（MeSO-net）による地中地震動記録を用いて、スペクトル比や一次元震動解析によって表層地盤の増幅特性を評価した。その結果、フーリエ振幅比と地盤のS波伝達関数の比較では、丘陵と沖積低地ともに20mまでのS波伝達関数と形状や卓越している周期がほぼ一致する結果となった。しかし、速度応答スペクトルとS波伝達関数を比較した結果、沖積低地では、工学的基盤までのS波伝達関数の卓越周期が、速度応答スペクトルの振幅が最大となる周期とほぼ一致する結果となった。このことから、東京ガスの広域地盤モデルのAVS20はある程度妥当なものであるといえるが、沖積低地などの地盤の軟弱な地点では地震動の増幅特性を

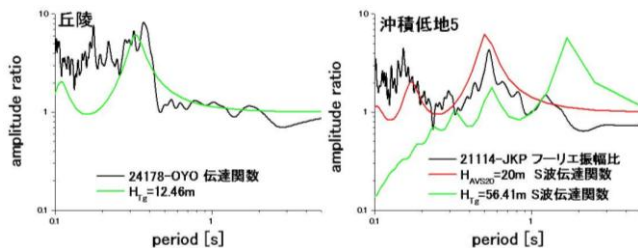


図-7 S波伝達関数とフーリエ振幅比の比較

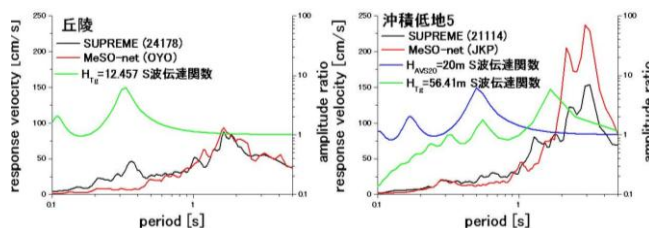


図-8 S波伝達関数と速度応答スペクトルの比較

十分に評価できていない可能性がある。これを解決するには、とくに低地では、20m以深の地盤データを考慮することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K., and Nakayama, W.: Development of real-time control system for urban gas supply network, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 2) 中山渉, 清水善久, 末富岩雄, 山崎文雄, 石田栄介: 超高密度地震観測に基づく地点の揺れ易さ評価, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 407-412, 2002.
- 3) 田村勇, 山崎文雄, Shabestari, K.T.: K-NET地震記録を用いた平均S波速度による地盤増幅度の推定, 土木学会第55回年次学術講演会, 1-B357, 2000.
- 4) 笠原敬司, 酒井慎一, 森田裕一, 平田直, 鶴岡弘, 中川茂樹, 楠城一嘉, 小原一成: 首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開, 地震研究所集報, Vol. 84, pp. 71-88, 2009.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 日本地震動予測地図技術報告書, 2009.
- 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, No. 523, pp. 63-70, 1999.
- 7) Ang, A. H-S. and Tang, W.H. (伊藤學, 亀田弘之 (訳)): 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 1997.
- 8) 国土地理院: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>
- 9) 国土地理院: 平成21年(2009年)8月11日5時7分頃の駿河湾の地震の震源断層モデルを推定, <http://www.gsi.go.jp/kenkyukanri/kenkyukanri60003.html>
- 10) 丸山喜久, 伏岡里志, 山崎文雄: 東京都地域危険度測定調査における地盤増幅率の再評価, 地域安全学会論文集, No. 16, pp. 21-29, 2012.
- 11) 鹿林, 山崎文雄, 片山恒雄: 千葉実験所における地震動観測-その5 自由地盤の伝達特性について-, 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp. 93-96, 1989.
- 12) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 13) 日本建築学会強震観測小委員会: 強震観測の手引き, <http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/KyoshinTebiki/index.php>