

高密度な地震観測記録を用いた 地盤震動特性の評価

猪股 渉¹・乗藤 雄基¹・大田 肇士²・丸山 喜久³

¹正会員 東京ガス株式会社 防災・供給部 (〒105-8517 東京都港区海岸1-5-20)

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

²東鉄工業株式会社 (元 千葉大学大学院) (〒160-8589 東京都新宿区信濃町34JR信濃町ビル4階)

E-mail: tadashi_811_0616_c@yahoo.co.jp

³正会員 千葉大学大学院 工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

本研究では、2005年千葉県北西部地震、2009年駿河湾沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震の際に東京ガスのリアルタイム地震防災システム“SUPREME”が高密度に観測した地表面地震記録および首都圏地震観測網(MeSO-net)による東北地方太平洋沖地震の際の地下20 mでの地中地震記録を用いて、東京都の地盤増幅度や地盤震動特性を推定し、SUPREMEの広域地盤データと比較した。この結果、SUPREMEの地盤増幅度は東京都の大部分で適切に評価されているが、東京都東部については20 m以深の地盤データを考慮することで、より妥当な地盤増幅率が設定できるものと考えられる。

Key Words : *site amplification characteristics, shear wave velocity averaged over the upper 20 m, Fourier spectrum ratio, transfer function*

1. はじめに

東京ガスでは、2001年からSUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake) と呼ばれるリアルタイム地震防災システムを導入し、高密度に配備された地震計(SIセンサー)により観測された地震記録をもとに、被害の大きい地区の都市ガス供給を局所的に停止する仕組みを構築した¹⁾。現在では、供給区域内の地区ガバナ(整圧器)約4,000箇所に、SIセンサーを設置している。SUPREMEによる地震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強さの補間を行い、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50 m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が搭載している広域地盤データでは、50 mメッシュ単位で地形区分、深さ20 mまでの平均S波速度(AVS20)、地盤増幅度、N値50相当の工学的基盤までの深度が整備されている。なお、地盤増幅度は、AVS20をパラメータとして推定されている³⁾。SUPREMEの地盤増幅度は、東京ガスの供給区域に関しては若松らが整備

した全国を均一な精度で評価できる微地形区分⁴⁾から推定される地盤増幅度⁵⁾よりも小さなメッシュサイズで細かく評価できる利点を有するため、東京都の地震被害想定などにも活用されている^{6, 7)}。

SUPREMEが稼働を開始してから10年以上が経過し、高密度な地震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。SUPREMEが搭載する広域地盤データの地盤増幅度は、システム稼働以前に構築された関係式³⁾をもとに推定されており、高密度な近年の地震観測記録を用いて地盤増幅率を再評価することは有用と考えられる。

本研究は、高密度に観測された地震記録を用いて、SUPREMEが搭載している広域地盤データの評価を行うことを目的とする。本研究では東京都を対象とし、他の供給区域に関しては順次検討を進める。まず、千葉県北西部地震(2005年7月23日)、駿河湾地震(2009年8月11日)、東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)について、東京23区内の地表面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で実際に観測されたSI値分布を比較し，広域地盤データの地盤増幅度の妥当性を評価する．さらに，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）⁸⁾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観測記録にもとづき推定する．また，SUPREMEに搭載されている広域地盤データのAVS20と工学的基盤までの深度にもとづき1次元地盤モデルを構築し，S波伝達関数を算出する．両者を比較することによって，SUPREMEの広域地盤データを検証する．

2. 地盤増幅度を用いた東京23区内の地表SI値分布の推定

本章では，SUPREMEが搭載している広域地盤データを用いて東京23区内の地表面SI値分布を推定し，SUPREMEによって観測されたSI値の分布と比較を行い，広域地盤データの地盤増幅度の妥当性を評価する．地震動強さの空間分布を推定するには，多数の観測値を用いた空間補間にもとづく手法が多い⁹⁾¹¹⁾．しかし，本研究では地盤増幅度を用いて推定したSI値分布と実際の観測値の分布を比較し，地盤増幅度の妥当性を評価することを目的としているため，SI値分布の推定の際にはあまり地震観測値を使用しない方が望ましい．

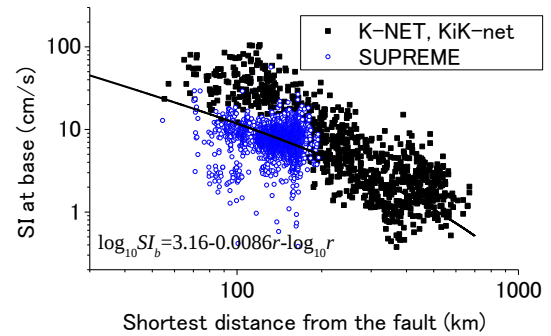
まず，地表面で観測されるSI値（ SI_s ）は，以下の式で表わされるものと仮定する．

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

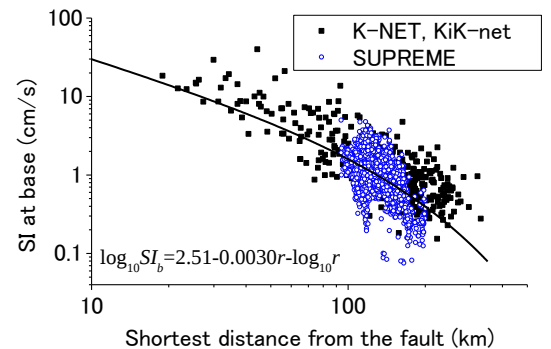
ここで， SI_b は工学的基盤におけるSI値， AR は表層地盤のSI値の増幅度である． SI_s の東京23区内における分布を評価するには， SI_b と AR の分布を仮定することが必要となる．

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¹²⁾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¹³⁾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¹²⁾．距離減衰式の標準偏差（ σ ）をばらつきとして採用し，S波速度600m/sの最大速度（ PGV_{600} ）によって以下のように定めている．

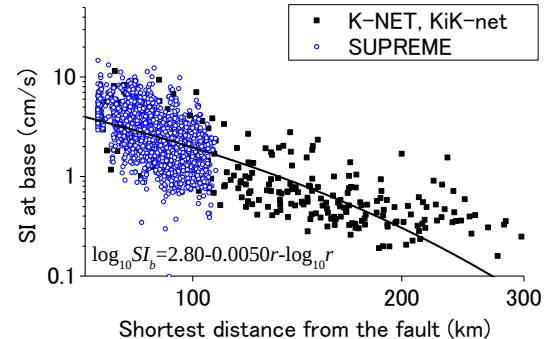
$$\sigma = \begin{cases} 0.20 & (PGV_{600} \leq 25 \text{ cm/s}) \\ 0.20 - 0.05 \cdot \frac{PGV_{600} - 25}{25} & (25 < PGV_{600} \leq 50 \text{ cm/s}) \\ 0.15 & (PGV_{600} > 50 \text{ cm/s}) \end{cases} \quad (2)$$



(a) 東北地方太平洋沖地震



(b) 駿河湾沖の地震



(c) 千葉県西北部地震

図-1 工学的基盤におけるSI値の距離減衰特性

本研究では，SI値の工学的基盤における距離減衰式の標準偏差を SI_b のばらつきとして用いることとする．K-NET，KiK-net，SUPREMEで観測された地震記録を用いて地表面SI値を算出し，これをJ-SHISで公開されている地盤増幅度⁵⁾，SUPREMEが搭載する地盤増幅度³⁾を用いて工学的基盤に割り戻し，回帰分析によって距離減衰式を構築した．なお，工学的基盤はS波速度600m/sの地層としている．距離減衰式の関数形は以下の通りである．

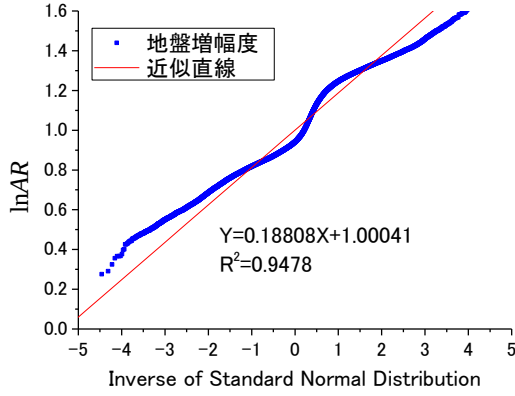


図-2 対数正規確率紙上の東京 23 区内の地盤増幅度の累積確率

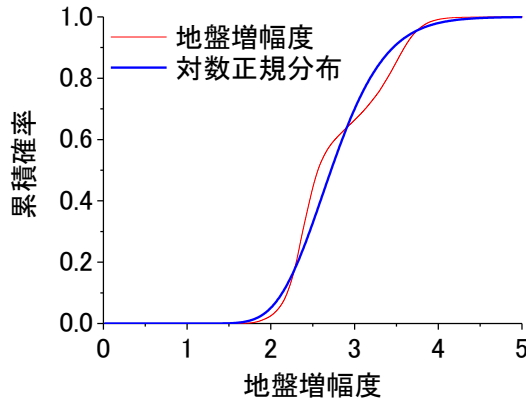


図-3 東京 23 区内の地盤増幅度の累積確率と対数正規分布の累積分布関数

$$\log_{10} SI_b = c_1 + c_2 r - \log_{10} r \quad (3)$$

ここで、 c_1 、 c_2 は回帰係数、 r は断層最短距離である。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値の距離減衰式を図-1に示す。東北地方太平洋沖地震と駿河湾沖の地震については、国土地理院が作成した断層モデル¹⁴⁾ ¹⁵⁾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。

それぞれの距離減衰式の標準偏差を式(4)より算出した。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。

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

図-1の結果から、東北地方太平洋沖地震は0.19、駿河湾沖の地震は0.20、千葉県北西部地震は0.21の標準偏差を示した。これは、式(2)の PGV_{b00} が25 cm/s以下の場合とほぼ等しい値となった。図-1の縦軸の値をみても、データ数が多いSUPREMEの観測値が一部を除きほぼすべて25cm/s以下を示しているので、本研究が得た基盤SI値の距離減衰式の標準偏差は妥当なものと考えられる。

式(1)の SI_b が対数正規分布に従うので、地盤増幅度ARが対数正規分布で表されると数学的に扱いやすい。ここでは、SUPREMEの地盤増幅度の空間分布を対数正規分布で表すことを試みた。東京23区について50mメッシュ単位で表されている地盤増幅度を整理し、確率紙上に表すと図-2のようになる。最小二乗法にもとづき回帰直線を構築したところ、決定係数は約0.95を示し直線性が高いものと推測される。これより、回帰直線から推定される対数平均(1.00)と対数標準偏差(0.188)を用いて、地盤増幅度の分布を対数正規分布でモデル化した¹⁶⁾ (図-3)。なお、地盤増幅度のばらつきに関しては、図-2、図-3で扱った空間的なばらつきだけでなく、50mメッシュ単位で推定された増幅度そのもののばらつき(AVS20による推定結果のばらつき)も挙げられる。本研究では、東京23区という比較的広い範囲での増幅度の空間的なばらつきを考えることで、上記のばらつきは内包されるものと仮定する。

このように、 SI_b 、 AR 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。

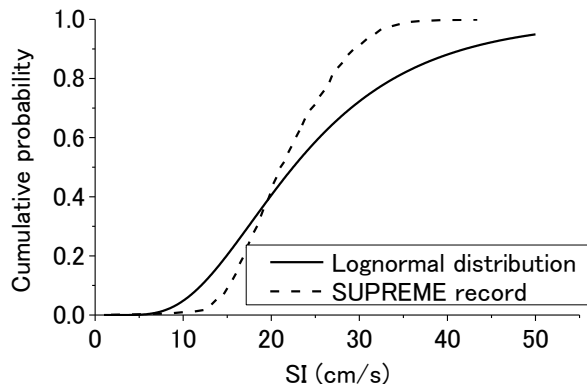
$$\mu_s = \mu_b + \mu_{AR} \quad (5)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_b^2 + \sigma_{AR}^2 \quad (6)$$

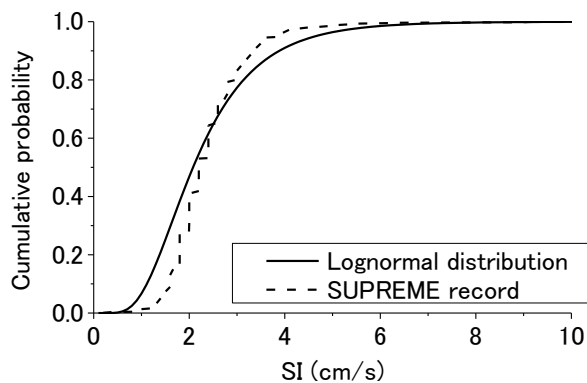
ここで、 μ_b 、 σ_b は工学的基盤におけるSI値の対数平均、対数標準偏差、 μ_{AR} 、 σ_{AR} は東京23区内の地盤増幅率の対数平均、対数標準偏差を表す。

式(1)および式(5)、(6)によって推定される東京23区の地表面SI値分布と実際にSUPREMEが観測したSI値分布を比較する。東北地方太平洋沖地震では1089、駿河湾沖の地震では1086、千葉県北西部地震では1059の観測値が東京23区内で取得されている。ここで、工学的基盤におけるSI値の平均値は、図-1に示した距離減衰式を用いて定める。各地震の際の東京23区の重心点の断層最短距離を算出し、距離減衰式に代入することで基盤SI値の平均値を得る。地表面SI値を推定する際に直接使用する地震動指標値はこれのみである。

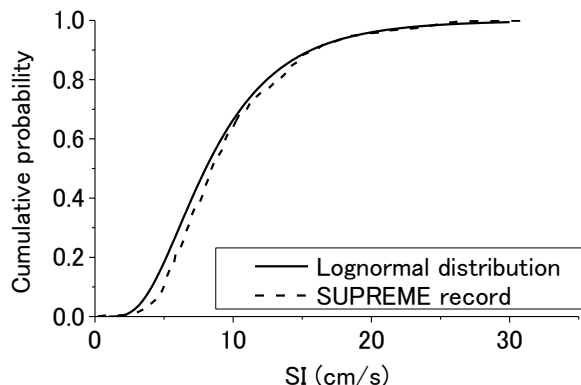
図-4に、推定された東京23区内の地表面SI値分布とSUPREME観測値の分布を累積相対度数で比較する。千



(a) 東北地方太平洋沖地震



(b) 駿河湾沖の地震



(c) 千葉県北西部地震

図-4 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

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やや低下しているように見える。このことから、SUPREMEに搭載されている地盤データのSI値増幅度は、

広域の地震動強さを評価するという観点で見れば、千葉県北西部地震、駿河湾沖の地震の際の増幅特性を適切に表し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増幅特性に関しては、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、次章にてさらなる検討を行う。

3. SUPREMEとMeSO-net観測記録を用いた地盤震動特性の評価

(1) フーリエ振幅比を用いた増幅特性の推定

首都圏で発生する大地震の詳細を明らかにすることを目的とし、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトでは、首都圏に新たな中感度地震観測点の配備をすすめてきた⁹⁾。首都圏地震観測網（MeSO-net）は2007年度より構築が始まり、観測点では深さ20m程度の観測井の孔底に3成分の加速度計が設置されている¹⁷⁾。図-5に、MeSO-net観測点の位置を示す。図中のシンボル色は、東北地方太平洋沖地震の本震の際のSI値の値を示している。東北地方太平洋沖地震では、248観測点の地下20mでの観測記録が得られた。

そこで、MeSO-netで得られた地中観測記録とSUPREMEの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2011年3月11日15時15分に発生した余震における表層20mの地盤の増幅特性を推定した。この際には、MeSO-net観測点とその近傍のSUPREME観測点を対として、バンド幅0.2HzのParzenウィンドウ¹⁸⁾で平滑化したフーリエスペクトルの水平2成分を合成し、その振幅比を算出した。また、MeSO-netとSUPREME観測点を組み合わせる際には、2点間の距離だけではなく両方が同一の地形区分に存在することも条件とした。東京都では、東京都震災対策条例の規定にもとづき、地域危険度測定調査¹⁹⁾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⁷⁾を参照し、MeSO-netとSUPREME観測点を対とした。図-6に、本研究で対としたMeSO-net観測点とSUPREME観測点の位置と東京都地域危険度測定調査で用いられている地盤種別を示す。また、観測点の2点間距離を表-1にまとめる。8つの地盤種別について、全部で42組の組み合わせを設定した。設定した観測点ペアの2点間距離は、最小で100m以下、最大で約1.4kmとなっており、平均は約600mである。また、谷底低地1～3に関しては、谷底低地と分類される地域の面積が小さく、さらにその地域が点在しているためMeSO-netとSUPREME観測点を対にすることができなかった。

図-7、図-8に、算出したフーリエ振幅比を示す。本研究は、SUPREME観測点の増幅特性を推定することを目

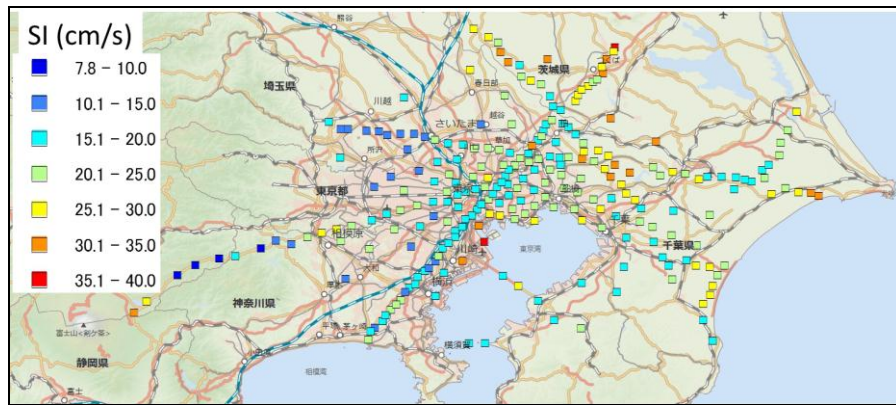


図-5 MeSO-net 観測点の配備状況と東北地方太平洋沖地震の際の SI 値

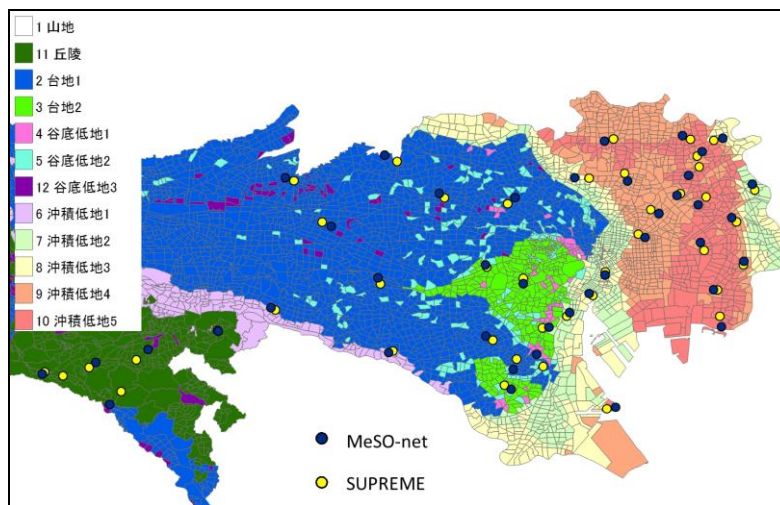


図-6 MeSO-net 観測点と SUPREME 観測点の組み合わせと地盤分類

表-1 MeSO-net 観測点と SUPREME 観測点の組み合わせと 2 点間距離

地盤分類	MeSO-net	SUPREME	Distance (m)
丘陵	BTS	24394	613.3
	KTO	24368	1167.2
	KYD	24347	99.7
	OBR	24174	1348.0
	OYO	24188	245.1
	OYO	24178	1425.0
台地 1	CF3	22507	357.1
	ENZ	20062	869.2
	GHG	20491	587.1
	HSU	20125	1077.1
	IKB	20927	709.8
	JYH	22581	635.0
	MNA	20563	500.3
	MSO	22438	534.7
	SKH	22299	710.9
台地 2	AYH	20422	459.2
	KDK	20136	549.2
	NSJ	20396	210.1
	TKM	20027	441.6
沖積低地 1	KNM	20733	302.0
沖積低地 2	GNZ	21253	309.8
	KK2	21743	523.6
	SBA	21041	384.0
沖積低地 3	MZM	21735	634.5
	OG6	21405	967.1
	SKM	21250	253.5
沖積低地 4	ICE	21631	296.8
	MKJ	21313	643.9
	NAR	20623	636.9
	OYT	21571	505.5
	RYN	21579	268.3
	YKK	21301	531.0
沖積低地 5	JKP	21114	630.4
	KBT	21565	845.4
	KCB	20333	1025.7
	KIM	21666	462.0
	KMG	21678	689.6
	KRP	21676	870.9
	NKS	21651	254.4
	SJS	21481	676.7
	TTN	21585	619.3

的としており、地盤分類ごとの増幅特性を把握することは目的としていないが、ここでは得られた結果を系統立てて整理するため地盤分類ごとにフーリエ振幅比を示す。

丘陵と台地における結果では、約0.3-0.4 sの周期帯の成分が表層20mの地盤の影響で増幅されていることが分かる。沖積低地3～5に関しては、約0.7-0.9 sの周期帯の成分

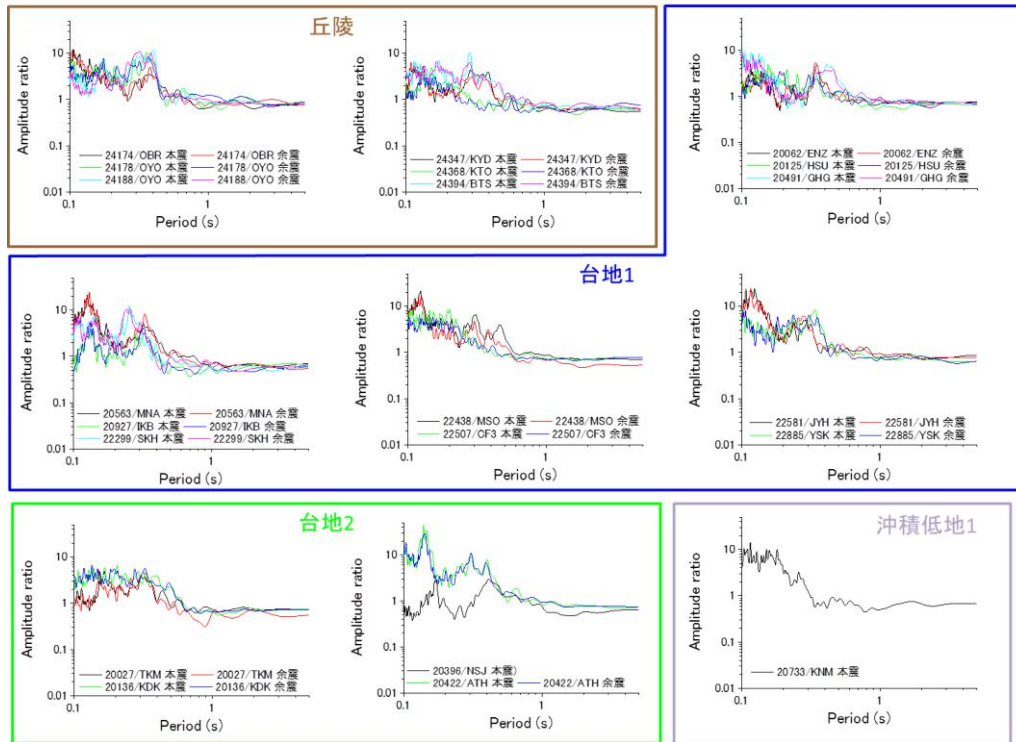


図-7 MeSO-net観測点と SUPREME 観測点のフーリエ振幅比（丘陵～沖積低地 1）

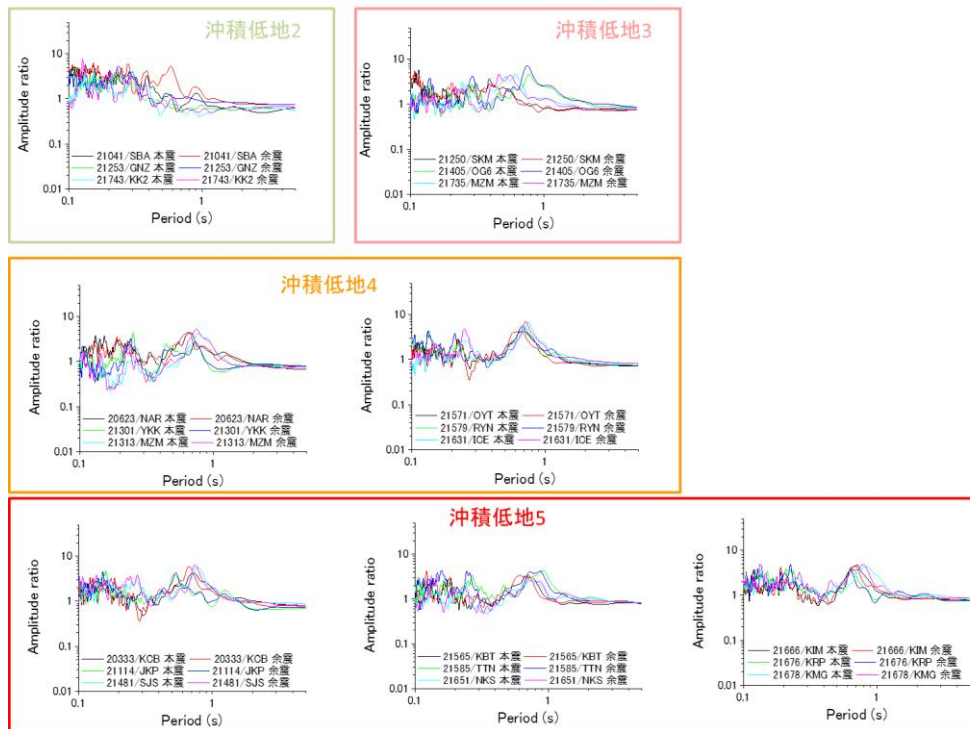


図-8 MeSO-net観測点と SUPREME 観測点のフーリエ振幅比（沖積低地 2～沖積低地 5）

が増幅されている。

本震時のフーリエ振幅比の卓越周期を読み取り、SUPREME観測点のAVS20の値を用いて1/4波長則から推定される卓越周期と比較する（図-9）。丘陵，台地1，台地2はAVS20から推定される地盤の卓越周期とフーリエ振幅比から推定した卓越周期がほぼ一致する結果とな

った。しかし沖積低地では、AVS20から推定される卓越周期がフーリエ振幅比の卓越周期よりもやや短い観測点が多い。1/4波長則は、一端固定，他端自由の場合の基本モードの振動形に対応するものである。図-9の結果は、沖積低地では、深さ20 mの層で固定端となる仮定が成り立ちにくかったことが原因となっている可能性もあるた

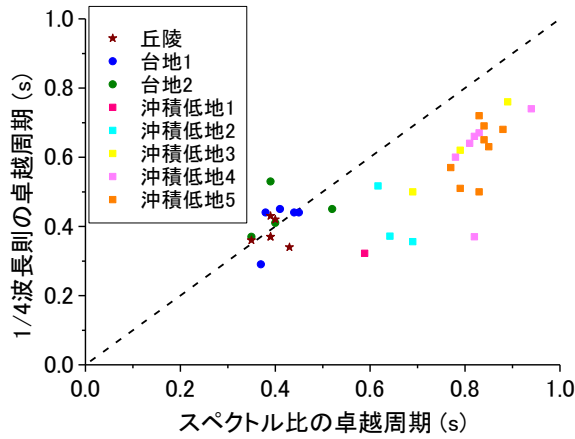


図-9 フーリエ振幅比の卓越周期と 1/4 波長則の卓越周期の比較

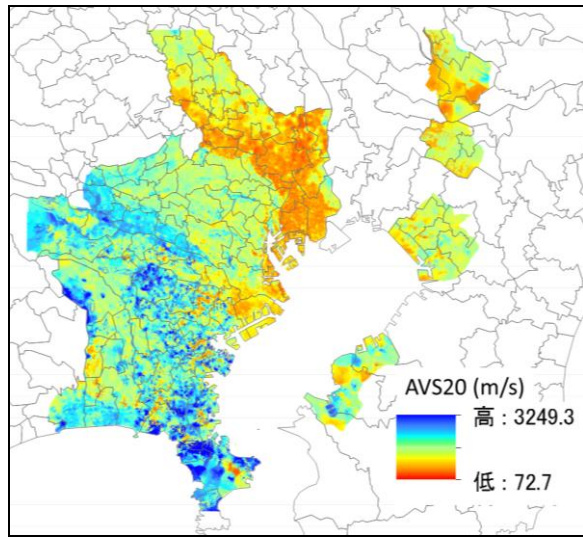


図-10 SUPREME の広域地盤データの AVS20 分布

め、次節にて1次元地盤震動解析による検討を行う。

(2) 一次元地盤震動解析を用いた増幅特性の検討

SUPREMEが搭載する広域地盤データでは、50mメッシュ単位でAVS20、AVS20から推定される増幅度、N値50相当の工学的基盤までの深度 (H_{Tg}) および工学的基盤に対する表層地盤の特性値 (Tg)²⁰⁾が整備されている(図-10、図-11)。なお、これらのデータは約6万本のボーリングデータのN値および換算したS波速度 (Vs) から構築されている²⁾。

本研究では、これらのデータを用いてSUPREME観測点の1次元地盤モデルを仮定し、地盤震動解析を行いS波伝達関数を推定した。仮定した1次元地盤モデルの模式図を図-12に示す。図中の各層のS波速度は次のように仮定した。まず、工学的基盤までの深さ (H_{Tg}) が20mよりも深い場合 (パターン1) は、1層目のS波速度を式 (7)

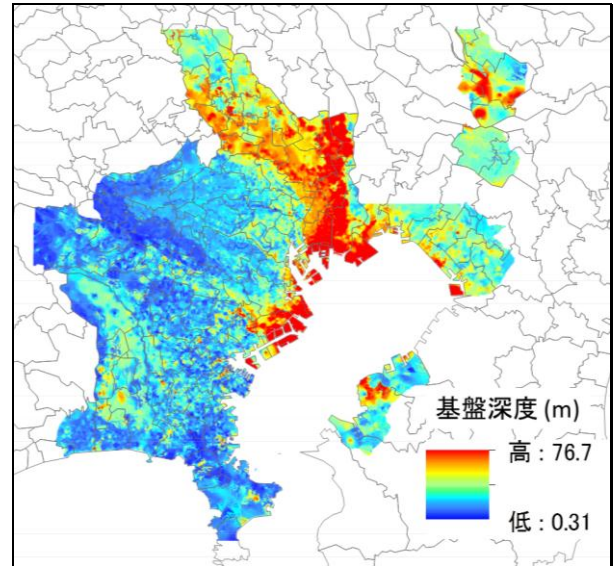


図-11 SUPREME の広域地盤データの N 値 50 相当の工学的基盤までの深度

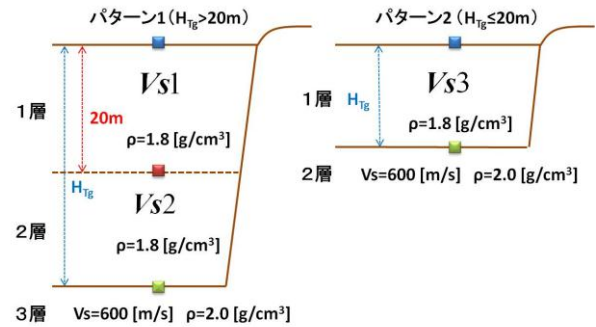


図-12 本研究で仮定した1次元地盤モデル

のように深さ20mの平均S波速度 (AVS20) とする。

$$Vs1 = AVS20 \quad (7)$$

2層目のS波速度には、深さ H_{Tg} までの地盤の特性値が Tg と一致するように、式(8)を満足する $Vs2$ を仮定する。

$$Tg = \frac{4 \times 20}{AVS20} + \frac{4(H_{Tg} - 20)}{Vs2} \quad (8)$$

H_{Tg} が20mよりも浅い場合は、式(9)のように1層目のS波速度 $Vs3$ を仮定する。

$$Vs3 = \frac{4 \times H_{Tg}}{Tg} \quad (9)$$

また、両パターンとも工学的基盤よりも深い地盤はS波速度600 m/sとした。これは、SUPREMEが用いている地盤増幅度がS波速度600 m/sを基準層としているためである。

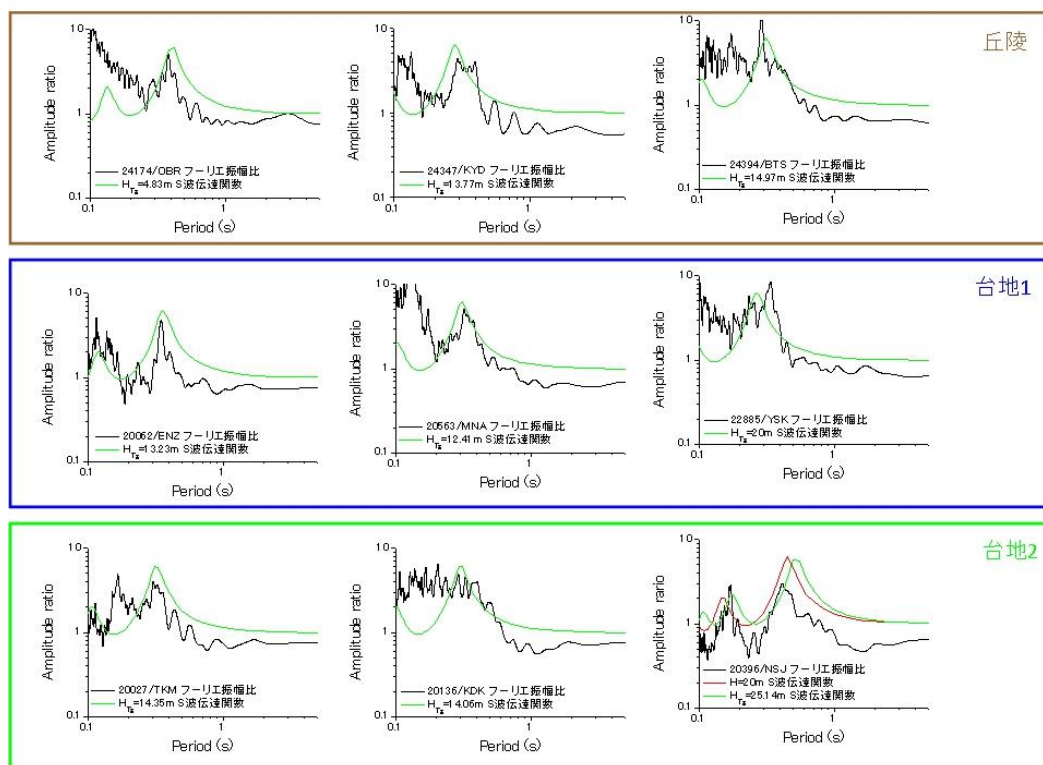


図-13 1次元地盤震動解析によるS波伝達関数とMeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比の比較（丘陵～台地2）

S波伝達関数と図-7、図-8に示したMeSO-net観測点とSUPREME観測点の東北地方太平洋沖地震本震時のフーリエ振幅比を比較する。1次元地盤震動解析によって推定するS波伝達関数は地中層に対する地表の応答とする。 H_{tg} が20 mよりも浅い場合（パターン2）は、2層目に対する地表面の伝達関数を算出する。 H_{tg} が20 mよりも深い場合（パターン1）は、3層目（深さ H_{tg} ）と2層目（深さ20 m）に対する地表面の伝達関数をそれぞれ算出する。このようにしたのは、MeSO-net観測点が深さ20 mの地中に設置されているためである。SUPREMEの広域地盤データでは地盤の非線形性は考慮できないので、ここでは線形応答を仮定した。また、フーリエ振幅比とS波伝達関数の振幅比の大きさをある程度一致させるために、減衰定数を國生らの方法²¹⁾にしたがって変化させ、S波伝達関数の振幅比の大きさを補正した。

図-13に、丘陵と台地1、台地2における結果の一部を示す。これらの地盤分類に属する観測点のほぼ全ては、図-12のパターン2（工学的基盤の深度が20 m以下）で1次元地盤モデルを作成したが、台地2に属するSUPREME観測点の1地点で工学的基盤までの深度が約25 mを示したため、パターン1でモデル化した（図-13の右下）。パターン2でモデル化した場合のS波伝達関数は、工学的基盤を基準とする増幅特性を表す（緑線）。パターン1（工学的基盤の深度が20 mより大きい場合）でモデル化した場合は、2種類のS波伝達関数が図示しており、赤線が深さ20 mの層に対する地表の伝達特性、緑線が工学的

基盤に対する地表の伝達特性を示している。さらに、パターン1の場合は、MeSO-net観測点は深さ20 mの地中に設置されているため、MeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比（黒線）は深さ20 mの層を基準とする伝達特性（赤線）と比較すべきものとなる。工学的基盤の深度が浅いパターン2でモデル化された観測点については、MeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比とS波伝達関数は周期に対して似た振幅形状を示し、卓越周期もほぼ一致している。また、図-13右下の工学的基盤の深度が20 mよりも大きかった地点についても、深さ20 mの層を基準とする増幅特性とフーリエ振幅比の卓越周期がほぼ一致した。一方で、表層地盤の増幅特性は工学的基盤を基準とするものであり、深さ H_{tg} の層を基準とする伝達特性（緑線）となる。図-13右下の観測点に関しては、深さ20 mの層を基準とした伝達特性と深さ H_{tg} の層を基準とする伝達特性に大きな違いは見られない。このことから、丘陵、台地1、台地2については、SUPREMEの搭載する広域地盤データは表層20 mの実地震の際の増幅特性を再現することができた。また、工学的基盤に対する表層地盤の増幅特性は、深さ20 mの層までの影響を考慮すれば評価することが可能である。

図-14に沖積低地1～5に関する結果の一部を示す。沖積低地1と2に属するSUPREME観測点の工学的基盤までの深度は20 m以下であったため、図-12のパターン2でモデル化し工学的基盤に対するS波伝達関数を図示している（緑線）。沖積低地3～5に属する観測点では、工学的

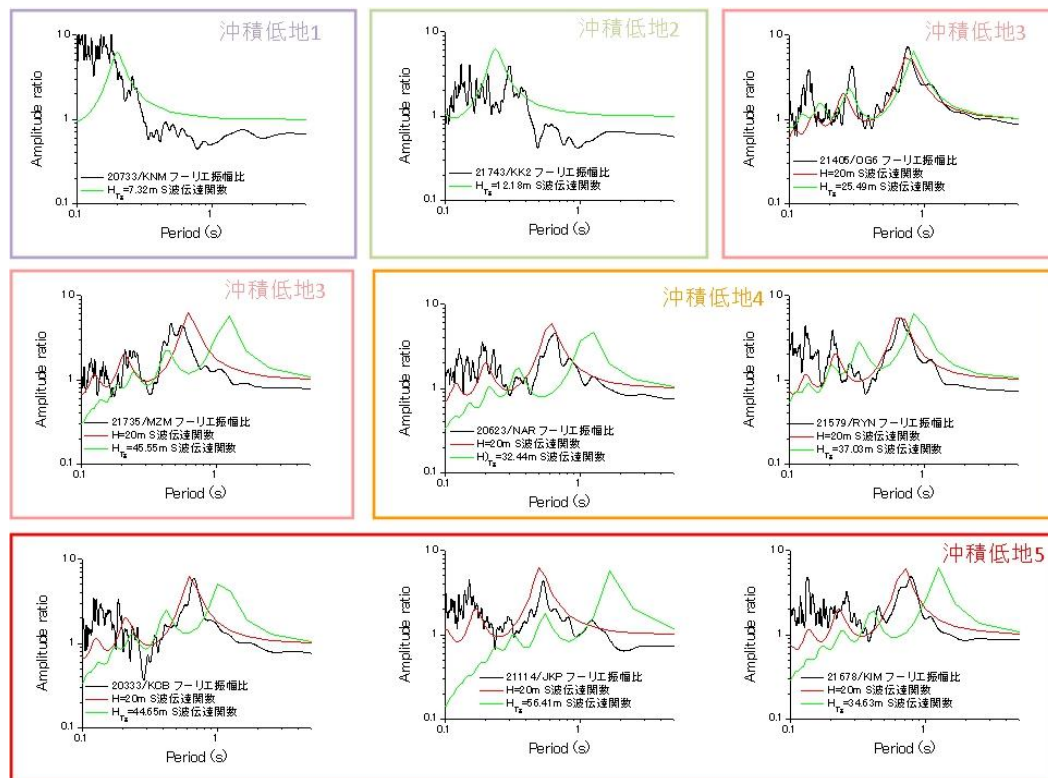


図-14 1次元地盤震動解析によるS波伝達関数とMeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比の比較
(沖積低地1～5)

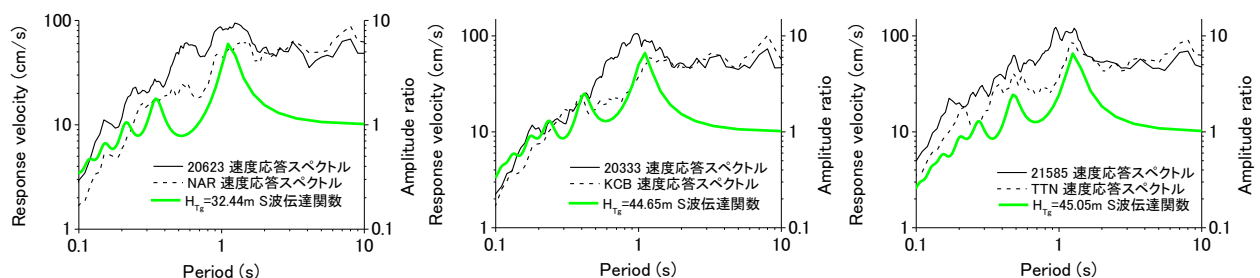


図-15 沖積低地4, 5に属するSUPREME観測点の東北地方太平洋沖地震本震の速度応答スペクトル(減衰定数5%)と工学的基盤を基準とするS波伝達関数の比較

基盤までの深度が20 mよりも大きいため、パターン1でモデル化し深さ20 mの層を基準とする伝達特性(赤線)と工学的基盤に対する伝達特性(緑線)が示してある。MeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比とS波伝達関数を比較すると、沖積低地1, 2に属する観測点に関しては、周期に対して似た振幅形状を示し、卓越周期もほぼ一致している。沖積低地3～5に属する観測点については、MeSO-net観測点とSUPREME観測点のフーリエ振幅比は深さ20 mまでの表層の増幅特性(赤線)によく一致している。しかし、これらの観測点の場合、工学的基盤までの深度が30～50 m以上を示すこともあるため、工学的基盤に対する増幅特性(緑線)と深さ20 mまでの表層の増幅特性(赤線)には差が見られることが多い。このことから、SUPREMEの広域地盤データにより推定される表層20 mの増幅特性は、観測地震記録の増幅特性

と一致したといえる。一方、主として東京都東部に位置する沖積低地3～5に属する地域に関しては、表層20 mの増幅特性と工学的基盤に対する増幅特性が異なることがある。SUPREMEの地盤増幅度は深さ20 mまでの平均S波速度(AVS20)をパラメータとしているが、沖積低地3～5の地域では十分な深度の影響を考慮できていない可能性がある。

図-15に、沖積低地4, 5に属するSUPREME観測点の東北地方太平洋沖地震本震の速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示す。また、図中には表-1で対とした地下20 mのMeSO-net観測点の速度応答スペクトル、工学的基盤を基準とするS波伝達関数も併せて示す。SUPREMEの地表観測記録の速度応答スペクトルは、周期約1-2秒の範囲で大きな値を示している。また、この周期帯は工学的基盤を基準とするS波伝達関数の卓越周期とほぼ一致

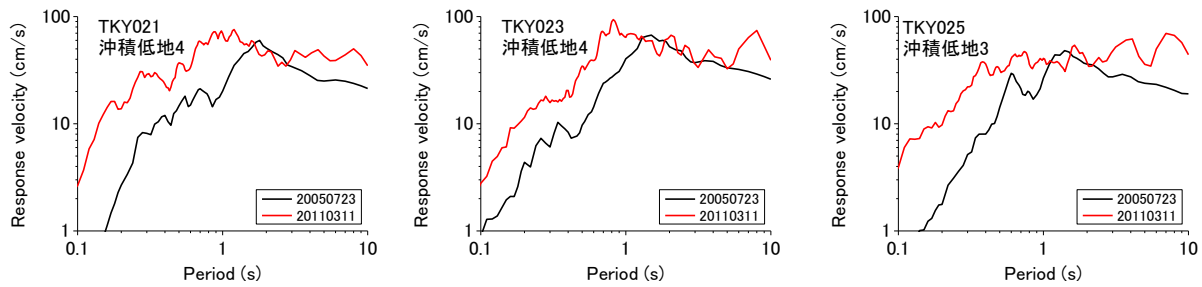


図-16 沖積低地3, 4に属する K-NET 観測点の東北地方太平洋沖地震と千葉県北西部地震の速度応答スペクトルの比較（減衰定数 5%）

している。SUPREME観測点の工学的基盤における観測波形が存在しないため、詳細に議論することは難しいが、工学的基盤を基準とするS波伝達関数は実際に観測された地表面地震動の周期特性とよく一致している。また、地表と地下20 mの両地点の速度応答スペクトルは、周期7-10秒にもピークを有することが分かる。沖積低地3, 4に属するK-NET観測点の速度応答スペクトル（図-16）を見ても、この周期帯に速度応答スペクトルのピークがあることが確認されるので、東京都東部で観測された東北地方太平洋沖地震の際の地震動の特徴の一つと思われる。

図-4(a)に示した結果は、東北地方太平洋沖地震では想定されるよりもSI値が大きくなかったとも読み取れる。SI値は減衰定数20%の速度応答スペクトルを周期0.1～2.5秒の範囲を積分して算出される¹⁾。東北地方太平洋沖地震で観測された地震動のうち周期2.5秒よりも長い成分はSI値に影響を与えないため、最大速度（PGV）などで表される地震動強さと比べるとSI値が小さめになっている可能性もある。図-4(c)に示した2005年千葉県北西部地震の際は、SUPREMEの時刻歴波形をオンラインで取得する仕様が構築中であったため、東北地方太平洋沖地震ほど多数の記録が得られておらず、とくに東京都東部の観測記録は収集されていない。そこで、図-16で沖積低地3, 4に属するK-NET観測点の千葉県北西部地震の際の速度応答スペクトルを併せて示し、東北地方太平洋沖地震の際と比較する。千葉県北西部地震の場合は、周期1-2秒でピークが見られるだけで地震動の長周期成分はあまり含まれていない。このような現象は、主として両地震のマグニチュードの違いや工学的基盤以深の地盤構造の影響程度の差が反映されたものと思われるが、千葉県北西部地震のようにマグニチュードが小さく、長周期成分があまり含まれない地震に関しては、現行のAVS20にもとづく増幅度でも実現象を精度よく説明できたのではないかと考えられる。

本節の検討結果をまとめる。観測記録にもとづく表層20 mの増幅特性は広域地盤データから仮定した1次元地

盤モデルで概ね説明できたため、SUPREMEの搭載する広域地盤モデルは妥当なものと評価される。しかし、東京都東部の地盤の増幅特性を評価するには、深さ20 mまでの影響を考える現状の方法では不十分な可能性もある。これを解決するには、例えば、SUPREMEの広域地盤データのうち工学的基盤に対する表層地盤の特性値（ T_g ）など、工学的基盤までの深度（ H_g ）まで地盤の影響を考慮できる変数をパラメータとして利用することが挙げられる。

4. 結論

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精度よく表現できたものと考えられる。

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、フーリエスペクトル比や1次元地盤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、台地、沖積低地ともに深さ20 mの層を基準とするS波伝達関数とフーリエ振幅比の形状や卓越している周期がほぼ一致する結果となった。一方、工学的基盤までの深度が20 mよりも大きい東京都東部では、深さ20 mの層を基準とするS波伝達

関数と工学的基盤を基準とするS波伝達関数の違いが大きく、観測記録の速度応答スペクトルの周期特性は工学的基盤を基準とするS波伝達関数の周期特性とよく対応していた。

これらの結果から、東京ガスの地震防災システム SUPREMEが搭載する広域地盤データは十分な精度を有すると考えられる。しかし、深さ20 mまでの影響をのみを考えた地盤増幅度は、地域あるいは地震タイプによって精度が低下する可能性もあるため、今後検討を要する。

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, I-B357, 2000.
- 4) 若松加寿江, 松岡昌志: 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版の構築, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp. 222-223, 2008.
- 5) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
- 6) 東京都防災会議: 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2012.
- 7) 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.
- 8) 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, 東京大学地震研究所集報, Vol. 84, pp. 71-88, 2009.
- 9) Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y. and Yogai, H.: Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 1158-1167, 2010.
- 10) 酒井久和, 長谷川浩一, ネルソン・ブリード, 佐藤忠信: 新潟県中越地震における強震動と道路被害の関係, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 52A, No. 1, pp. 301-308, 2006.
- 11) 築地拓哉, 寺嶋黎, 庄司学, 永田茂: 2011 年東北地方太平洋沖地震において被災した上水道配水管網の被害の傾向—茨城県潮来市および神栖市の事例分析—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_260-I_279, 2013.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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>
- 15) 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>
- 16) 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.
- 17) 汐見勝彦, 佐々木俊二, 酒井慎一, 笠原敬司, 関根秀太郎, 中川茂樹, 小原一成, 平田直, 棚田俊収: 地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網 (MeSO-net) の設置方位推定, 東京大学地震研究所集報, Vol. 84, pp. 115-125, 2010.
- 18) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 19) 東京都都市整備局: 地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第 6 回), 2008.
- 20) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 5 耐震設計編, 2012.
- 21) 國生剛治, 佐藤克晴, 長尾晋悟: KiK-net 地震記録を用いた基盤から地表への震動増幅評価法, 日本地震工学会論文集, Vol. 8, No. 2, pp. 16-31, 2008.

(2013.9.19 受付)

EVALUATION OF SITE AMPLIFICATION CHARACTERISTICS USING DENSE GROUND MOTION RECORDS

Wataru INOMATA, Yuki NORITO, Tadashi OTA and Yoshihisa MARUYAMA

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. 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. 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.