

首都圏高密度観測記録に基づく地盤増幅率のモデル化と応答スペクトル分布推定

末富 岩雄¹・石田 栄介¹・水上 清二²・田村 健²

¹正会員 (株) エイト日本技術開発 防災保全事業部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)
E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp, ishida-e@ej-hds.co.jp

²正会員 東京ガス株式会社 防災・供給部 (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)
E-mail: mizukami@tokyo-gas.co.jp, tamuken@tokyo-gas.co.jp

東京ガスでは安全な都市ガス供給のため、首都圏で約 4,000 点の超高密度観測網を構築している。これまで都市ガスの供給停止判断基準に用いる SI 値を対象として、観測点の揺れやすさ評価を行い、地質分類や表層地盤の平均 S 波速度との関係について検討を行ってきた。本研究では、震源特性やサイト増幅特性の影響をよりの確に反映できるように、応答スペクトルの増幅率を回帰分析により算定し、地質分類ごとにパラメータをモデル化した。そして、2005 年 7 月の千葉県中部の地震等での観測スペクトルを、提案モデルを用いて補間推定を行い、モデルの妥当性を確認した。

Key Words: *super-dense array observation, Tokyo metropolitan area, spectral amplification, regression analysis*

1. はじめに

地震発生直後の対応を考える際に、判断基準や被害推定指標として、気象庁は震度分布、都市ガスでは SI 値のように単一の地震動指標を現行では用いている。対象施設・設備の特性や震源・サイトに起因する地震動特性等により地震動と被害の関係は異なってくるので、被害分析等の事後検討や将来より高度な即時推定を行うためには、応答スペクトルを活用して周期特性を反映することが考えられる。現在の一般的な通信環境において、周期点 10~20 程度の応答スペクトルであれば、即時利用が可能である。被害推定等の指標として SI 値を用いる場合でも、応答スペクトルでサイト特性を考慮し補間推定を行えば、推定精度が高まると期待される。

地震観測記録を用いて観測点の増幅率を評価する方法は、1)ダミー変数等を用いた距離減衰式の回帰分析、2)観測点ペアによる方法、に大別される。1)の距離減衰式に関する研究は多いので、多くの事例がある(例えば 1)2)。観測点については地盤情報なしでも地点係数として評価できる反面、広域の面的推定を行う場合には、観測点以外の増幅率評価のために、地盤情報と関連づけたスペクトル増幅率モデルが必要となる。米国の NGA プロジェクト(例えば 3)5)では多くのモデルが提案されているが、表層地

盤の増幅特性については非線形化の影響も含め同様の式からスタートしており、いずれも深さ 30m までの平均 S 波速度(V_{s30})の関数で表現されている。そして、 V_{s30} が小さい地点での増幅は全周期で大きく、 V_{s30} が大きい地点での増幅は全周期で小さいような特性となっている。しかしながら、スペクトルを算定する目的は、構造物や表層地盤の周期特性を反映した評価をすることにあるので、地盤の固有周期等を考慮せず、単に軟らかいか硬いかのみの評価法は目的に合致していないと考えられる。2)の方法は主に V_{s30} 等と増幅スペクトルを関連づける目的で用いられる。山口・翠川(2011)⁶⁾は V_{s30} から算定する方法を提案し、さらに山口・翠川(2014)⁷⁾では非線形化の影響を考慮する方法も提案している。しかしながら、卓越周期を明示的に扱っておらず、土のせん断ひずみ依存性との関連が曖昧である。また、先名・翠川(2009)⁸⁾では、先名・翠川・若松(2008)⁹⁾での常時微動の H/V スペクトルを用いたスペクトル増幅率に基づき微地形区分毎の平均スペクトルを算定し、4 次関数のモデルを提案している。実際は同一の地質分類であっても地域により S 波速度構造は異なっているので、このモデルはあくまでも全国平均の特性を表すものであり、地形区分による差異は大きくないモデルとなっている。

東京ガスは、2001 年 7 月より超高密度地震観測記録に

基づく防災システム「SUPREME」を運用し¹⁰⁾、2011年東北地方太平洋沖地震の際にも速やかに観測SI値を収集し被害推定を行っている¹¹⁾。この際の観測波形データなど、これまでに多くの記録が得られており、乗藤ら(2014)¹²⁾ではSI値について各観測点におけるSI値増幅率を求め、地質分類毎の平均的なSI値増幅率を算定した。末富ら(2012)¹³⁾では、横浜市の強震観測データから岩盤観測点を基準点としてスペクトル増幅率を横浜市の各観測点について算定した。

末富ら(2018)¹⁴⁾では、増幅特性には地域性も強いと考えられることから首都圏に特化した面的なスペクトル推定を可能とするために、東京ガスの「SUPREME」で蓄積した観測データを用いて、応答スペクトルの回帰分析により各観測点のスペクトル増幅率を算定した。首都圏の地質分類毎の平均的なスペクトル増幅率を算定し、卓越周期とピーク値をパラメータとするモデル化を行った。本論文では、オンラインで近年のデータ収集することにより観測データを大幅に追加し、末富ら(2018)¹⁴⁾では1,321観測点でスペクトル増幅率を算定したところを、3,818観測点と約3倍に充実し、高密度観測記録をより活用したスペクトル推定を行う。また、増幅率の算出手順も、地震動の特性を踏まえ見直す。

2. 観測点のスペクトル増幅率の評価

末富ら(2018)¹⁴⁾では、東京ガス観測データで回帰分析を行ったが、本論文では地震計の精度が広帯域で確保されている(国研)防災科学技術研究所のK-NETと横浜市の強震観測データを用いることとし、**図-1**の手順でスペクトル増幅率モデルを構築する。回帰分析により距離減衰式を算定し(①②)、これに対する比を東京ガスの各観測点について算定する(③)。次に各観測点で平均スペクトル増幅率を算定する(④)。その平均スペクトル増幅率の卓越周期とピーク値 T_i 、 G_p の地質分類毎の平均値を求め(⑤)、50mメッシュの T_i 、 G_p を地質分類の平均値と各観測点の値を距離の重みづけで統合することにより構築する(⑥)。

(1) 回帰分析に用いる対象地震

図-2に首都圏近傍で2002年から2016年の間に発生したM4以上の地震の56地震の震央分布を、**表-1**にその地震諸元を示す。震源情報は、気象庁の「地震・火山月報(防災編)」による。150点以上で観測されている地震で、鳥島近海や新潟県など遠方の地震を除いている。ほとんどが、M5.0前後の中規模地震であり、深さ60km前後の地震が多い。他に多くの観測点で記録が得られて

いる地震として、2011年東北地方太平洋沖地震の本震・最大余震(本震から30分後)があるが、地盤の非線形化が生じている可能性があり、また地震規模も他地震に比べ突出した大きさであるので、対象から外した。●は回帰分析に用いるK-NET観測点である。

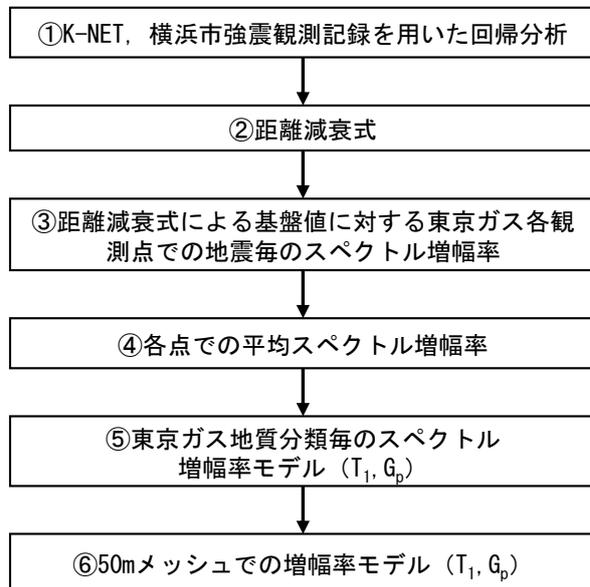


図-1 スペクトル増幅率モデルの検討手順

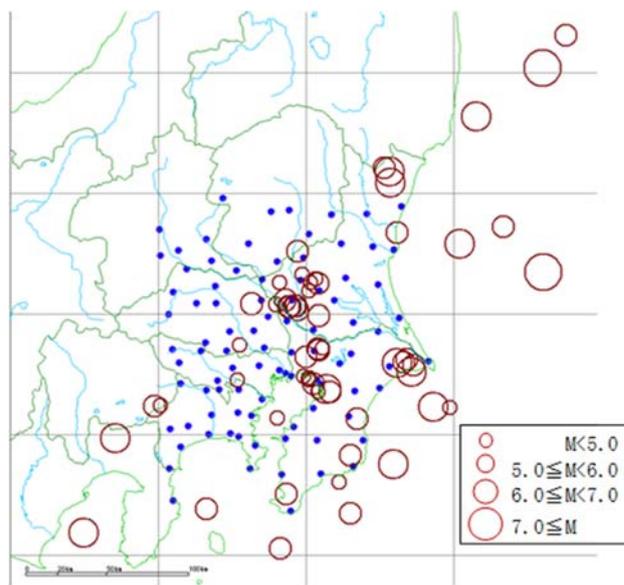


図-2 対象地震の震央分布

(2) 回帰方法

対象地震は中規模の地震であるので、下式の基本的な式形を用いて回帰分析を行う。震源深さの範囲もやや偏っているものの、説明変数として加えた決定係数の方が高かったため、導入している。観測点毎に得られる回帰係数 $A_i(T)$ は、観測点の増幅率を表す地点係数である。

表-1 検討に用いた地震の諸元

No.	発生年月日	震央地名	東経	北緯	M	深さ(km)	観測点数
1	1999. 9. 13 7:56	千葉県北西部	140.1667	35.5667	5.1	80	292
2	2000. 4. 10 6:30	茨城県南部	140.0683	36.1867	4.6	55	218
3	2000. 6. 3 17:54	千葉県北東部	140.7183	35.6767	6.0	48	239
4	2001. 7. 20 6:02	茨城県南部	139.8250	36.1667	4.8	56	267
5	2001. 9. 18 4:23	東京湾	139.8117	35.4200	4.2	45	456
6	2002. 6. 14 11:42	茨城県南部	139.9800	36.2117	4.9	57	255
7	2003. 9. 20 12:54	千葉県南部	140.3033	35.2150	5.8	70	344
8	2003.10.15 16:30	千葉県北西部	140.0517	35.6100	5.1	74	423
9	2004.10. 6 23:40	茨城県南部	140.0917	35.9850	5.7	66	654
10	2005. 2. 16 4:46	茨城県南部	139.8950	36.0350	5.4	45	579
11	2005. 4. 11 7:22	千葉県北東部	140.6200	35.7267	6.1	52	259
12	2005. 7. 23 16:34	千葉県北西部	140.1383	35.5817	6.0	73	1,788
13	2005.10.16 16:05	茨城県南部	139.9367	36.0383	5.1	47	653
14	2005.10.19 20:44	茨城県沖	141.0417	36.3817	6.3	48	304
15	2006. 5. 2 18:24	伊豆半島東方沖	139.3300	34.9167	5.1	15	463
16	2006. 8. 31 17:18	東京湾	140.0233	35.6317	4.8	76	685
17	2006.10.14 6:38	千葉県南東沖	140.3033	34.8933	5.1	64	318
18	2008. 8. 8 12:57	神奈川県東部	139.5367	35.6300	4.6	30	292
19	2009. 8. 11 5:07	駿河湾	138.4983	34.7850	6.5	23	712
20	2011. 3. 15 22:31	静岡県東部	138.7133	35.3083	6.4	14	677
21	2011. 3. 19 18:56	茨城県北部	140.5700	36.7833	6.1	5	154
22	2011. 4. 12 8:08	千葉県東方沖	140.8667	35.4817	6.4	26	358
23	2011. 4. 16 11:19	茨城県南部	139.9450	36.3400	5.9	79	465
24	2011. 7. 15 21:01	茨城県南部	140.0833	36.1633	5.4	66	183
25	2012. 1. 28 7:43	山梨県東部・富士五湖	138.9767	35.4883	5.4	18	146
26	2012. 7. 3 11:31	千葉県南部	139.8700	35.0000	5.2	88	161
27	2012.11.24 17:59	東京湾	140.0167	35.6367	4.8	72	156
28	2015. 5. 25 14:28	埼玉県北部	139.6383	36.0533	5.5	56	303
29	2015. 9. 12 5:49	東京湾	139.8283	34.6983	5.2	57	504
30	2016. 2. 5 7:41	神奈川県東部	139.5400	35.6300	4.6	26	617
31	2016. 5. 16 21:23	茨城県南部	139.8867	36.0333	5.5	42	1,012
32	2016. 7. 17 13:24	茨城県南部	139.9283	36.0383	5.0	42	785
33	2016. 7. 19 12:57	千葉県北東部	140.3517	35.4150	5.2	33	521
34	2016. 7. 20 7:25	茨城県南部	139.9483	36.0200	5.0	42	350
35	2016. 9. 7 13:28	茨城県南部	140.0350	36.1667	4.9	50	425
36	2016.11.22 5:59	福島県沖	141.6033	37.3533	7.4	25	1,495
37	2016.12.28 21:38	茨城県北部	140.5733	36.7200	6.3	11	1,321
38	2017. 2. 19 18:19	千葉県北東部	140.6633	35.7300	5.4	52	342
39	2017. 8. 2 2:02	茨城県北部	140.5350	36.8033	5.5	9	974
40	2017. 8. 2 7:15	茨城県南部	140.0217	36.1200	4.6	48	443
41	2017. 8. 10 9:36	千葉県北西部	140.0900	35.7967	5.0	64	1,741
42	2017. 9. 14 9:27	埼玉県南部	139.5533	35.8267	4.5	50	765
43	2017.10. 6 23:56	福島県沖	141.1550	37.0867	5.9	53	488
44	2017.12.27 22:05	東京湾	140.0833	35.5650	4.5	69	697
45	2018. 1. 2 19:48	東京湾	139.9883	35.6517	4.3	48	344
46	2018. 1. 6 0:54	東京湾	140.0217	35.6433	4.7	71	2,568
47	2018. 2. 26 1:28	福島県沖	141.7617	37.5367	5.8	40	887
48	2018. 3. 30 8:17	茨城県沖	140.6200	36.4417	5.1	56	483
49	2018. 5. 15 14:00	山梨県東部・富士五湖	139.0200	35.4917	4.3	27	300
50	2018. 5. 17 12:12	千葉県北東部	140.7300	35.7150	5.3	52	804
51	2018. 7. 7 20:23	千葉県東方沖	140.5917	35.1650	6.0	57	2,798
52	2018. 9. 5 5:11	茨城県沖	141.3367	36.4750	5.5	60	432
53	2018. 9. 10 23:58	千葉県南東沖	140.2250	35.0650	4.7	35	220
54	2018. 9. 18 17:11	埼玉県南部	139.7983	36.0483	4.3	77	796
55	2018.10.12 13:15	千葉県北東部	140.6883	35.7450	5.2	52	577
56	2018.11.27 8:33	茨城県南部	139.8633	36.0717	5.0	44	1,561

$$\log_{10}S(T) = a(T) \cdot M + b(T) \cdot X - \log_{10}X + c(T) \cdot D + d(T) + \sum_{i=1}^N A_i(T) \cdot S_i \quad (1)$$

$S(T)$: 加速度応答スペクトル (減衰 5%)

T : 周期 (秒)

M : 気象庁マグニチュード

X : 震源距離(km)

D : 震源深さ(km)

S_i : ダミー変数, j 番目の観測点で得られた記録のとき $S_j=1$, 他の $S_i=0$

$a(T)$, $b(T)$, $c(T)$, $d(T)$, $A_i(T)$: 回帰係数

東京ガスの観測データは, SI 値については地震発生後数分以内に収集するが, 波形データについては点検時の回収としており, またそれぞれの観測点では 10 記録までを保存する仕様となっている. そのため, 回収までに上書きされていくので, 末富ら(2018)¹⁴⁾では個別の観測点では必ずしも回帰分析に十分な記録が蓄積されているわけではなかった. 本論文では, 2018 年 12 月にオンラインで全点の記録を収録したので 2016 年以降の地震記録を充実させている. 末富ら(2018)¹⁴⁾と同様に, 対象地震のうち 3 記録以上の波形データがある観測点を対象とし, 観測点を 1,312 点から 3,818 点へと大幅に増加している.

(3) 回帰分析結果

決定係数 R^2 を図-3 に示す. マグニチュード(M)の係数 $a(T)$ と距離(X)の係数 $b(T)$ を, 図-4 に示す. $a(T)$ は周期 2 秒でピークを示し, 長周期側では小さくなっている. 末富ら(2018)¹⁴⁾と同様の結果であり, 中規模地震を対象としているためと考えられる. 係数 $b(T)$ も周期 7 秒以上では正になっているので, 信頼できるのは 3~5 秒以下の範囲と考えられる.

決定係数は周期 0.3 秒以下では小さくなり, $a(T)$ は周期が短いほど大きくなるが, これは短周期の増幅は地震によるバラツキが大きいことに起因し, 本論文の以降の検討で用いる個々の地点のスペクトル増幅率の信頼性に直結するものではないと考えられる.

3. 地質分類とスペクトル増幅率の関係

(1) 地質分類

東京ガスでは, 地質分類図を作成している (以下, 東京ガス地質分類). これは, 国土地理院の土地条件図を基としつつ, 首都圏における地形を考慮して若干の分類の追加等を行ったものである¹⁰⁾. その分布図を図-5 に示す.

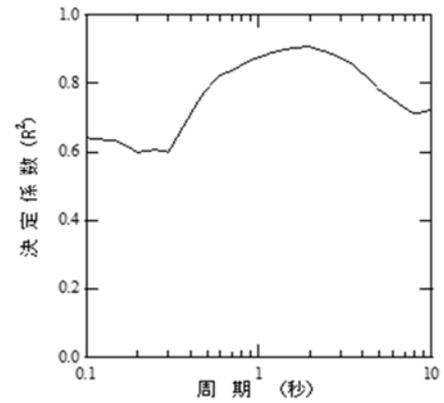


図-3 決定係数

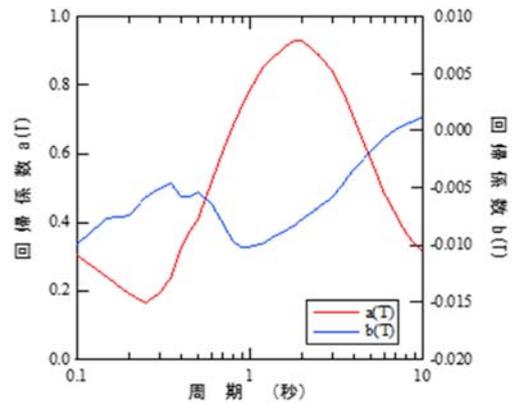


図-4 M 項の係数 $a(T)$ と距離減衰項の係数 $b(T)$

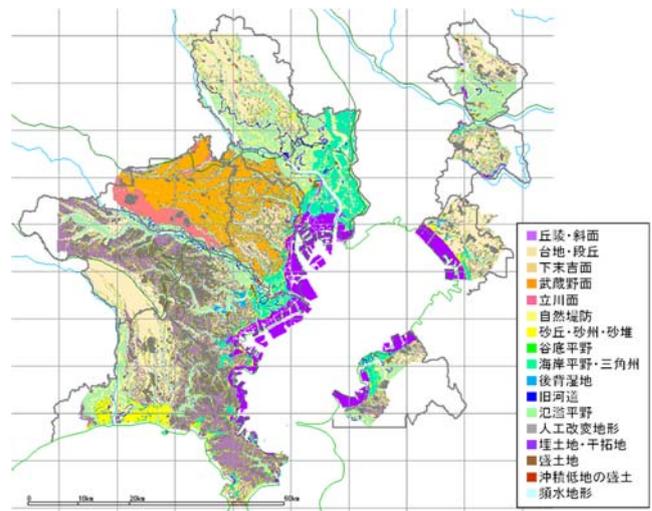


図-5 東京ガス地質分類図

各観測点について, 平均スペクトル増幅率を算定した例を図-6 に示す. ピーク増幅率のバラツキは大きいものの, 卓越周期は安定しており, 赤線のように平均スペクトル増幅率を算定した.

(2) スペクトル増幅率モデル

本論文では, 弱震時の増幅率について検討するが, 次のステップでは強震時における非線形化を考慮したモデ

ル化を行う予定である。そのためには、池田ら¹⁵⁾と同様に、卓越周期とピーク値をパラメータとして地盤ひずみに応じた剛性と減衰の変化を反映させるのが、理論的な基本特性を反映しつつ少ないパラメータで扱えるので合理的と考えられる。この2つのパラメータで増幅率をモデル化しているものとして、2000年度の改正建築基準法において、比較的簡便な方法として示されている表層地盤増幅係数 G_s の式^{16),17)}がある。これは、式(2)で表されるが、一次卓越周期 T_1 を表層地盤の等価せん断波速度 V_s と表層地盤の層厚 H から算定するのではなく、実際の観測値に基づき与えるものとする。ピーク増幅率 G_p も同様である。

$$\begin{aligned}
 T \leq 0.8T_2 & \quad G_s = 1.0 \\
 0.8T_2 < T \leq 0.8T_1 & \quad G_s = 1.0 + \frac{G_p - 1}{0.8(T_1 - T_2)} (T - 0.8T_2) \\
 0.8T_1 < T \leq 1.2T_1 & \quad G_s = G_p \\
 1.2T_1 < T & \quad G_s = G_p + \frac{G_p - 1}{1.2T_1 - 0.1} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1.2T_1} \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 $T_2 = \frac{T_1}{3}$

非線形化の影響のみ、この式を用いたモデルを適用し、観測点でのスペクトル増幅率をそのまま用いる方法も考えられるが、バラツキが大きいので本論文では関数モデルで検討する。短周期側の倍率を1.0とする点の改良なども含め、さらなる精度向上については今後の課題としたい。

地質分類ごとに定めた卓越周期 T_1 とピーク増幅率 G_p を表-2に示す。卓越周期の平均、ピーク増幅率の平均、をそれぞれ算定したものである。

表-2 東京ガス地質分類毎の提案モデルのパラメータの平均値

地質分類	卓越周期: T_1	ピーク値: G_p	観測点数
丘陵・斜面	0.175	3.59	172
台地段丘	0.164	4.88	492
下末吉面	0.176	4.15	53
武蔵野面	0.204	3.76	358
立川面	0.111	4.02	72
自然堤防	0.409	3.08	135
砂丘砂州砂堆	0.364	2.34	97
谷底平野	0.242	3.71	238
海岸平野・三角州	0.488	3.10	358
後背湿地	0.447	3.51	15
旧河道	0.423	3.08	58
氾濫平野	0.448	3.22	360
氾濫平野2	0.354	3.60	359
河川敷等	0.375	2.62	18
人工改変	0.223	3.65	415
埋立・干拓	0.602	3.13	83
沖積低地の盛土	0.579	2.42	19

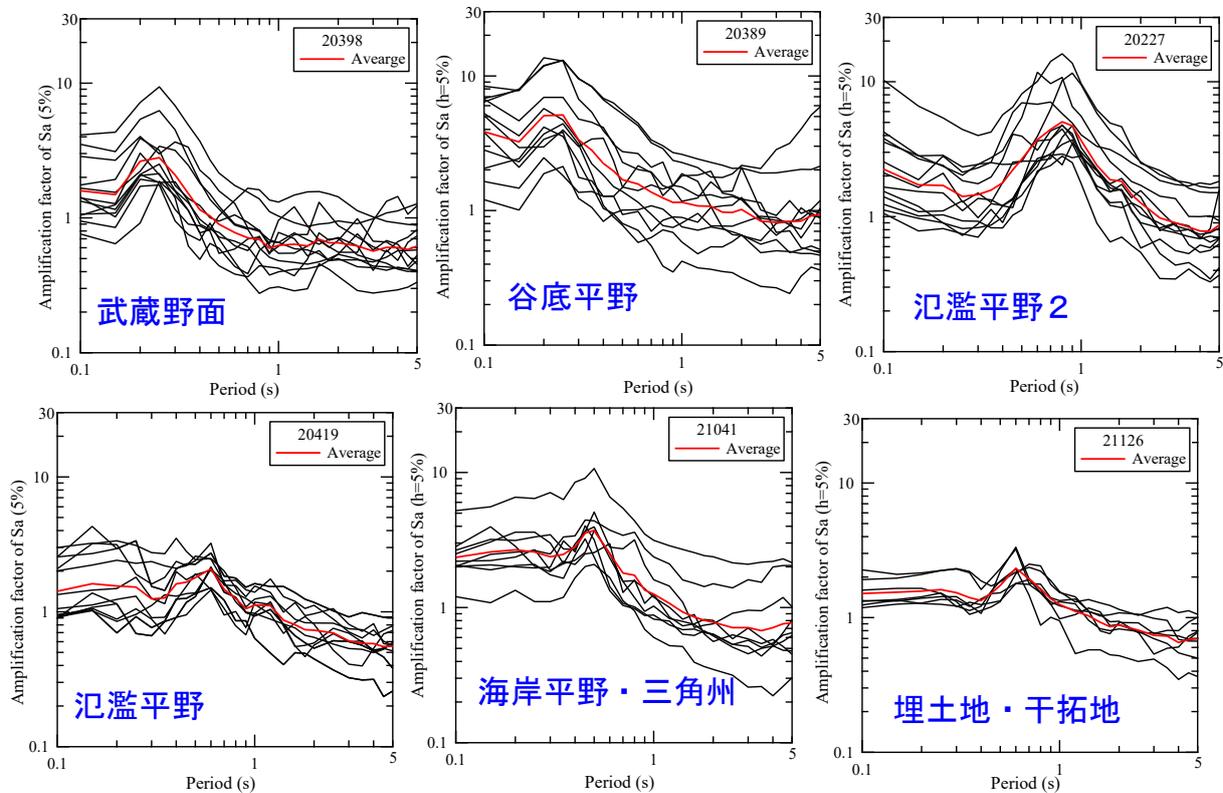


図-6 東京ガス観測点の増幅スペクトルの例 (青字: 東京ガス地質分類)

4. 50mメッシュスペクトル増幅率データの構築

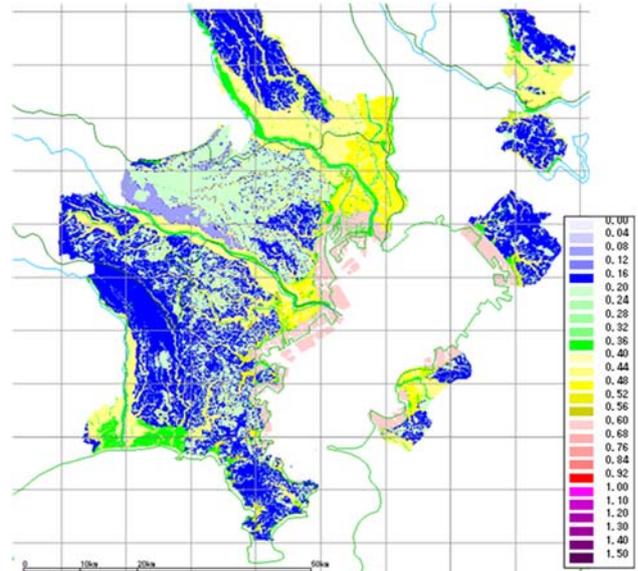
提案するモデルの卓越周期 T_1 とピーク増幅率 G_p の2つのパラメータをそれぞれ空間補間により算定することで、50mメッシュの増幅率データを構築することが可能である。末富ら(2007)¹⁸⁾の地形分類による V_s30 とボーリングデータによる V_s30 を結合して V_s30 を算定する方法と同様に、2つのパラメータについて、50mメッシュの東京ガス地質分類と地震観測点での値を、距離の重みづけで統合することにより算定する。

図-7に重みを変えて算定した卓越周期の分布を示す。図-7(a)は統合前の表-2の平均パラメータの分布である。低地と丘陵の差異は明瞭で、丘陵は0.2秒前後、低地は0.6秒以上となっている。地震観測点での値と統合した図-7(b)(c)では、荒川河口周辺と多摩川河口周辺で特に周期が長くなっているなど、地質分類のみでは考慮できない層厚の影響等を加味できていると考えられる。図(c)の方が埋立地で観測点による差異がよく面的に現れていると考えられるので、 $\zeta=100$ 、 $r_g=100m$ として算定した結果を用いる。ピーク増幅率も同じ条件で算定する。

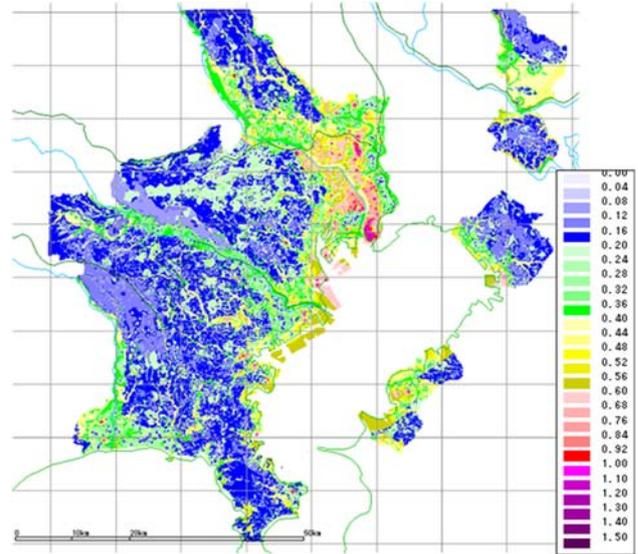
5. 実地震での検証

実際の観測地震で、他機関観測記録と補間推定結果を比較することで精度を検証する。これまでに最も多くの地点で観測記録が得られているのは、2011年東北地方太平洋沖地震での本震と最大余震であるが、液状化地点等で地盤の非線形化の影響を受けていると考えられる。本論文での提案モデルは、線形モデルにとどまっているので、表-1のNo.12, No.31, No.46の3地震で試算を行う。No.12の2005年7月23日16時34分に千葉県中部（当初、気象庁は千葉県北西部と発表）で発生したM6.0の地震では、地震発生直後の供給停止等の判断に活用されている¹⁹⁾。SUPREMEでの観測記録と、図-7の統合法による地盤情報を用いて提案モデルによる増幅率モデルを用いて、工学的基盤上でIDW法による補間を行って、地表面での加速度応答スペクトルを算定する。

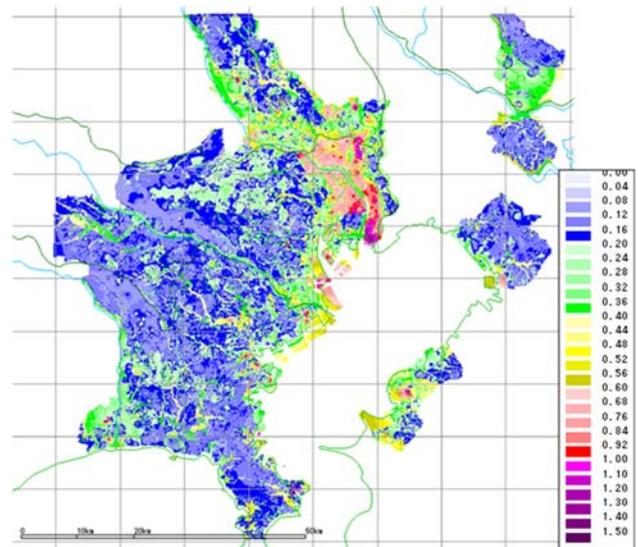
得られた周期0.5秒と1.0秒における最大加速度応答の分布を図-8から図-10に示す。周期0.5秒で大きな応答となっているところは、地震によって異なり、内陸の低地部など広く見られるが、周期1.0秒で大きくなるのは東京東部低地や多摩川河口周辺など表層地盤が軟らかく厚いと考えられる箇所限定されている。



(a)東京ガス地質分類のみ

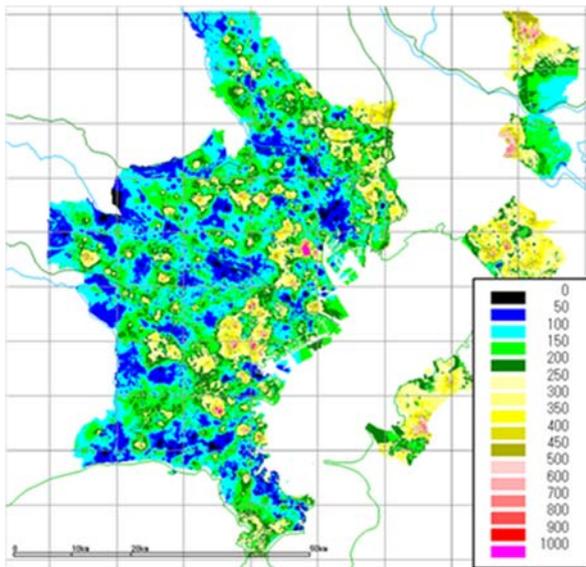


(b)統合法 ($\zeta=10$, $r_g=100m$)

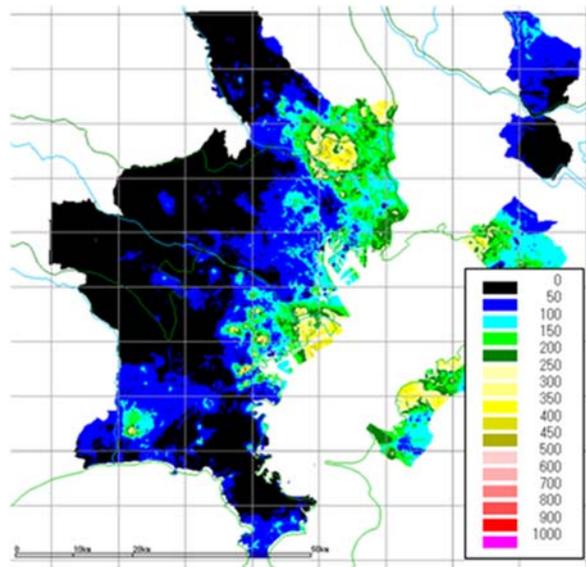


(c)統合法 ($\zeta=100$, $r_g=100m$)

図-7 卓越周期分布 (50mメッシュ)

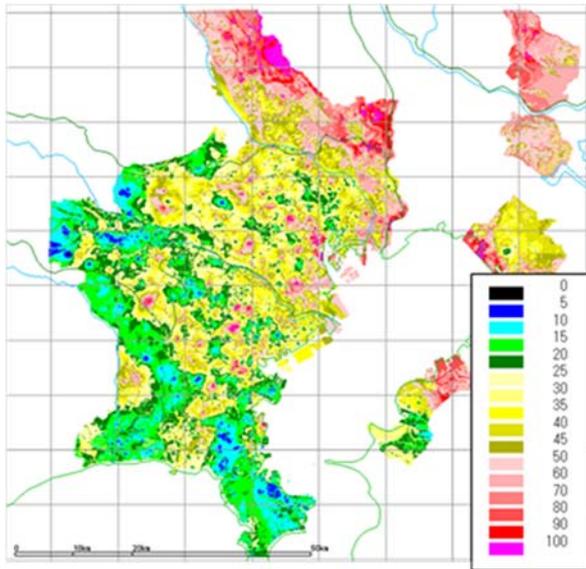


(a)周期 0.5 秒

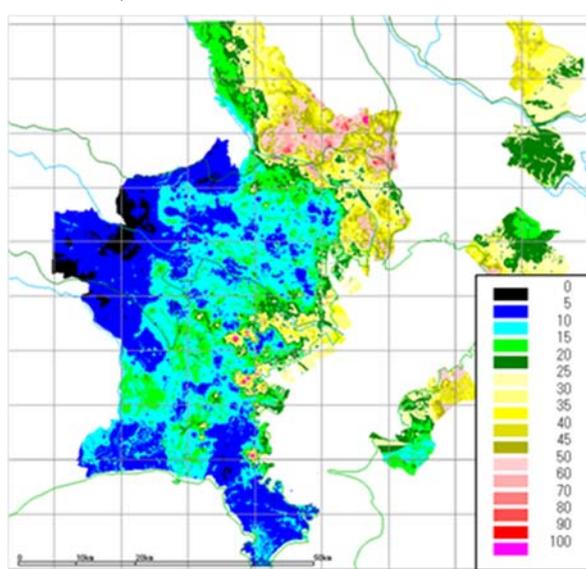


(b)周期 1.0 秒

図-8 最大加速度応答（減衰 5%）の分布（No.12,2005 年千葉県中部の地震）

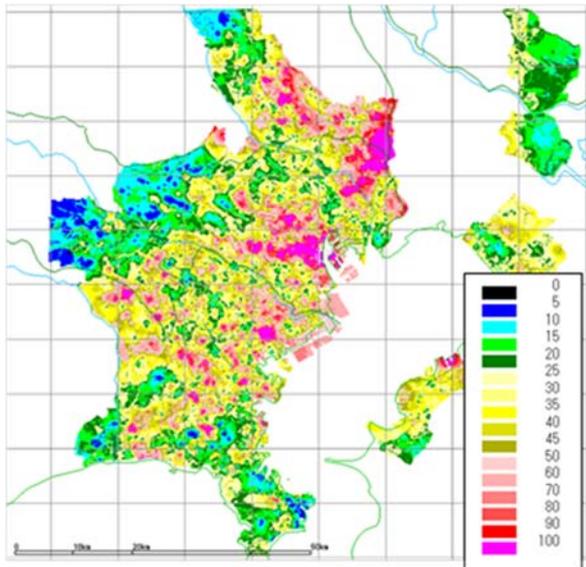


(a)周期 0.5 秒

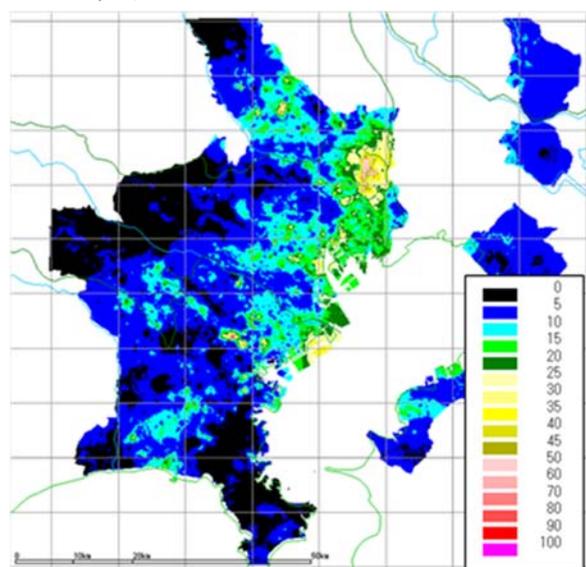


(b)周期 1.0 秒

図-9 最大加速度応答（減衰 5%）の分布（No.31,茨城県南部を震源とする地震）



(a)周期 0.5 秒



(b)周期 1.0 秒

図-10 最大加速度応答（減衰 5%）の分布（No.45, 東京湾を震源とする地震）

6. おわりに

本論文では、東京ガスの高密度観測記録を用いて応答スペクトル増幅率のモデル化検討を行った。以下に主な結果を記す。

- 1) K-NET等の観測記録の加速度応答スペクトル(減衰5%)の回帰分析により、首都圏中規模地震の距離減衰式を構築し、これに対する比として、東京ガスの高密度地震観測点におけるスペクトル増幅率を算出した。
- 2) 1)の結果から、各観測点の平均スペクトル増幅率を算出した。卓越周期 T_l とピーク増幅率 G_p をパラメータとする増幅モデルを構築し、各観測点の平均スペクトル増幅率の値の平均値を地質分類ごとに算定した。
- 3) 東京ガスの50mメッシュ地質分類と観測点での増幅スペクトルから、卓越周期とピーク増幅率をそれぞれ距離の重みを用いて空間補間を行い、50mメッシュの増幅スペクトルのデータセットを構築した。
- 4) 2005年千葉県中部等の3地震を対象に分布推定を行い、提案モデルの適用性を確認した。

距離減衰式構築に用いたK-NET等は50mメッシュ構築や3地震の補間に用いておらず、今後、これらの観測値との比較で検証を行う予定である。その結果に基づき、増幅モデルの改良を行って、精度を高めると共に、J-SHISの地質分類との対応付けなど他地域への拡張性や表層地盤の非線形化の影響も取り込んでいく予定である。

謝辞：「本論の作成に当たっては、横浜市強震観測網、(国研)防災科学技術研究所の記録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。

参考文献

- 1) Kamiyama, M. and Yanagisawa, E.: A statistical model for estimating response spectra with emphasis on local soil conditions, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.2, pp.16-32, 1986.
- 2) Kanno, T., Nrita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y.: A new Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.96, pp.879-897, 2006.
- 3) Abrahamson, N. A. and Silva, W. J.: Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes, *Seismological Research Letters*, Vol.68, No.1, pp.94-127, 1997.
- 4) Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E. and Atkinson, G. M.: NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1057-1085, 2014.

- 5) Chiou, B. S.-J. and Youngs, R. R.: Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, Vol.30, No.3, pp.1117-1153, 2014.
- 6) 山口亮, 翠川三郎: 地盤の平均S波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良, *日本地震工学会論文集*, 第11巻, 第3号, pp.85-101, 2011.
- 7) 山口亮, 翠川三郎: 観測記録に基づく地盤増幅率の非線形特性のモデル化, *日本地震工学会論文集*, 第14巻, 第1号, pp.56-70, 2014.
- 8) 先名重樹, 翠川三郎: 地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定, *日本地震工学会論文集*, 第9巻, 第4号, pp.11-25, 2009.
- 9) 先名重樹, 翠川三郎, 若松加寿江: 常時微動のH/Vスペクトル比と地形・地盤分類を用いたスペクトル増幅率の推定, *日本地震工学会論文集*, 第8巻, 第4号, pp.1-15, 2008.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 乗藤雄基, 猪股渉, 末富岩雄, 石田栄介, 山崎文雄, 鈴木崇伸: 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, *土木学会論文集A1(構造・地震工学)*, Vol.70, No.4, I_520-I-526, 2014.
- 13) 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.
- 14) 末富岩雄, 石田栄介, 小山高寛, 木村裕明: 首都圏高密度観測記録を用いたスペクトル分布推定の一検討, 第15回日本地震工学シンポジウム, No.1028, 2018.
- 15) 池田孝, 加藤研一, 石田寛: 地震観測記録に基づく地盤増幅率の非線形性のモデル化, *日本地震工学会論文集*, 第18巻, 第2号, pp.130-146, 2018.
- 16) 平成12年度国土交通省告示第1457号、2000.
- 17) 日本建築学会: 地震荷重一性能設計への展望、丸善株式会社、2008.
- 18) 末富岩雄, 石田栄介, 福島康宏, 磯山龍二, 澤田純男: 地質分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅率評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の推定, *日本地震工学会論文集*, 第7巻, 第3号, pp.1-12, 2007.: 2007.
- 19) 菜花健一, 細川直行, 山内亜希子: SUPREMEによる千葉県北西部地震観測情報の利用事例, *日本地震工学会論文集*, 第7巻, 第2号(特集号), pp.209-214, 2007.

SPECTRAL AMPLIFICATION MODELS AND A SPECTRAL DISTRIBUTION
ESTIMATION USING SUPER-DENSE OBSERVATION RECORDS IN
METROPOLITAN AREA

Iwao SUETOMI, Eisuke ISHIDA, Seiji MIZUKAMI and Ken TAMURA

Tokyo Gas has built a super-dense observation network of about 4,000 in the Tokyo metropolitan area for safe gas supply. We evaluated the amplification factors of SI value at the observation points, and examined the relation between the topography classification and the average S wave velocity of the surface layer. In this study, the amplification of the response spectrum is calculated by regression analysis and the parameters are modeled for each topography classification. Then, the validity of the proposed model was confirmed by interpolation estimation using the observation spectrum of the earthquake in central Chiba prefecture 2005.