

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

末富 岩雄¹・福島康宏¹・石田 栄介¹・
猪股 渉²・乗藤雄基²・山崎文雄³・鈴木崇伸⁴

¹正会員 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

²正会員 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

³正会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻教授 (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33)

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

⁴正会員 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

各種施設の被害推定に用いる地震動強度指標として、SI値や計測震度等が用いられることが多い。地震動の震源特性や地盤の増幅特性は周波数特性を有するので、より精度良く地震動分布を推定するためには、応答スペクトルを用いるのが有効である。一方で、即時被害推定システムにおいては、簡易に評価できる必要がある。本論文では、横浜市強震観測網の記録を用いて、各点の平均スペクトル比を評価し、これを用いて応答スペクトルの補間推定を行った。その結果、1)応答スペクトルを用いることが有効である、2)SI値への影響が大きい周期0.5~2.5秒において、深さ20mまたは30mまでの平均S波速度と増幅率の相関がよい、3)平均スペクトル比を用いることで精度良く地震動を推定できる、ことが分かった。

Key Words : *response spectrum, interpolation estimation of ground motion, Yokohama city, dense array observation, SI value*

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、地震防災システム「SUPREME」を運用している。ガス導管の被害推定式において、地震動強度指標としてSI値を採用しているため、約4,000箇所の地震計から観測SI値を収集し、50mメッシュの補間推定を行って、被害推定を行っている¹⁾。その推定精度を高めるためには、地震動分布推定精度や被害推定式の精度向上が重要である。

地震動分布を推定する上では、地盤の増幅度評価が重要である。そのために、「SUPREME」では約6万点のボーリングデータを整備し、50mメッシュで深さ20mまでの平均S波速度(AVS20)のデータベースを構築している。このAVS20の関数として、SI値増幅度を評価している。一方で、このSI値増幅度の大きさは、入力地震動の周波数特性や表層地盤の増幅度の周波数特性の影響を強く受ける性質を有する。SI値は減衰20%の速度応答スペクトルを積分することによって得られる値であるため、地震計で観測される情報及び地盤の増幅特性を応答スペクト

ルで扱い、対象地点の応答スペクトルで推定した後に、SI値を算定すれば、各種の周波数依存の特性を考慮できるので高精度推定が可能になると考えられる。

任意地点の応答スペクトルの増幅度を評価する方法として、1) AVS30をパラメータとするスペクトル増幅度、2)地盤モデルによる伝達関数等による方法、3)観測記録から得られる平均増幅度、が考えられる。1)は比較的簡易でありモデル化によっては地盤の非線形化の影響を考慮することも可能である。例えば、米国・NGAプロジェクトでは、共通のデータベースを用いて、距離減衰式の開発を行っており、スペクトル増幅度もAVS30の関数として評価されている。例えば、Campbell and Bozorgnia²⁾があるが、非線形化によって卓越周期が延びることは表現されていない。2)については、石井ら³⁾は、地盤内応力分布をサイン関数で仮定した上で、等価線形解析的に地盤モデルに基づく収束計算により伝達関数を算出する方法を提案している。成層地盤モデルを必要とするため、やや煩雑であるため検証がまだ十分とは言えない。3)は対象地点に対しては高い精度

が期待できるものの、空間補間に対してはK-NETであれば20km程度の間隔になるなど地震計密度の点から検討されてこなかった方法である。しかしながら、「SUPREME」の地震計は約1km間隔であるので、3)の手法を活用することも可能と考えられる。

横浜市強震観測網（以下、READY）⁴⁾は、150箇所の観測点からなり、その間隔は2km程度と近い。これまでに多くの地震観測記録が得られており、岩盤条件に近い観測点を基準として、増幅度を精度良く評価することが可能である。また、各点でPS検層が、泥岩または土丹層に達するまで実施されている。このように高密度観測でかつ地盤調査も行われていることから、これまで増幅度に関する多くの研究が行われている。特に本研究に関係するものとして、非線形化モデルの検討までは行われていないものの、翠川ら⁵⁾は前述の1)に該当するAVSの関数として応答スペクトルを回帰分析の結果としてモデル化している。補間推定手法の検証を行う観点からも、横浜市は起伏に富んでおり、増幅度を考慮しない単純な補間では精度が落ちるのは明らかであるので、検証に適していると考えられる。

本論文では、観測点の速度応答スペクトルの基準点に対する比の平均値を求め、これを用いて、空間補間を行う手法について検証を行う。また、地盤パラメータと増幅度の関係についても検討する。

2. 横浜市観測点の平均増幅スペクトル評価

(1) 対象地震

横浜市強震観測網では、10年以上にわたって地震観測記録が蓄積されており、150地点での地震観測記録³⁾を収集・整理し、本論文では、以下の条件で対象地震を抽出する。

- ① iz02(泉区緑園消防出張所)で記録が得られている
- ② マグニチュード $M_{JMA} \leq 6.0$ 、震央距離 $\Delta \leq 150\text{km}$
- ③ iz02での観測記録の最大加速度 $PGA \geq 4\text{cm/s}^2$

①は、iz02がほぼ岩盤が露頭している観測条件であるので、後の検討でスペクトル比を算出する基準点とすることによる。②は首都圏近傍での地震を対象とするために設けた条件であり（想定地震の震源域での地震、S波が卓越している地震を抽出）、震央距離はiz02からの距離で判定する。③は小振幅の記録を除くために設けた条件（SN比と大地震への適用性から）である。本論文では、平均値を算出する際の記録数を20前後確保するために、やや小さい記録も含まざるを得ず、 4cm/s^2 としている（0.1~5秒まででSN比を確保）。

抽出した対象25地震の諸元を表-1に、震央分布を図-1、その震源深さを図-2に示す。千葉県北西部での地震が多く、地震規模はM5前後、深さは60km前後である。伊豆半島東方沖で起きる地震は、深さ20km以内の浅いところで発生している。

表-1 検討対象地震の諸元

地震番号	発生日時	震源域	地震規模 M_J	震源深さ(km)
eq97801	1997. 8. 9 5:34	埼玉県南部	4.7	70
eq98502	1998. 5. 3 11:09	伊豆半島東方沖	5.7	3
eq98510	1998. 5. 16 3:45	千葉県南部	4.8	74
eq98824	1998. 8. 29 8:46	東京湾	5.1	67
eq98y05	1998. 11. 8 21:40	千葉県北西部	4.6	78
eq99905	1999. 9. 13 7:56	千葉県北西部	5.0	77
eq01908	2001. 9. 18 4:23	東京湾	4.2	45
eq03505	2003. 5. 12 0:57	茨城県南部	5.2	47
eq03813	2003. 8. 18 18:59	千葉県北西部	4.6	69
eq03903	2003. 9. 20 12:54	千葉県南部	5.8	70
eq03x14	2003. 10. 15 16:30	千葉県北西部	5.1	74
eq04706	2004. 7. 17 15:10	房総半島南東沖	5.5	69
eq04801	2004. 8. 6 3:23	千葉県北西部	4.6	75
eq04x03	2004. 10. 6 23:40	茨城県南部	5.7	66
eq05204	2005. 2. 16 4:46	茨城県南部	5.4	45
eq05708	2005. 7. 23 16:34	千葉県北西部	6.0	73
eq05x04	2005. 10. 16 16:05	茨城県南部	5.1	47
eq06202	2006. 2. 1 20:35	千葉県北西部	5.1	101
eq06413	2006. 4. 21 2:50	伊豆半島東方沖	5.8	7
eq06502	2006. 5. 2 18:24	伊豆半島東方沖	5.1	15
eq06808	2006. 8. 31 17:18	東京湾	4.8	76
eq06x03	2006. 10. 14 6:38	千葉県南東沖	5.1	64
eq07x03	2007. 10. 6 3:46	神奈川県西部	4.2	32
eq08804	2008. 8. 8 12:57	茨城県南部	4.6	45
eq08917	2008. 9. 21 7:17	東京湾	4.8	71

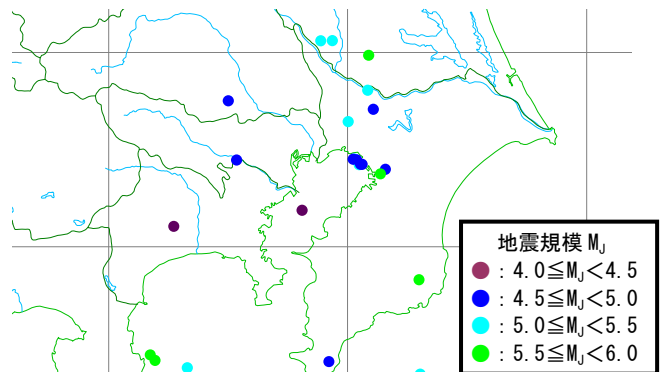


図-1 検討対象25地震の位置と地震規模

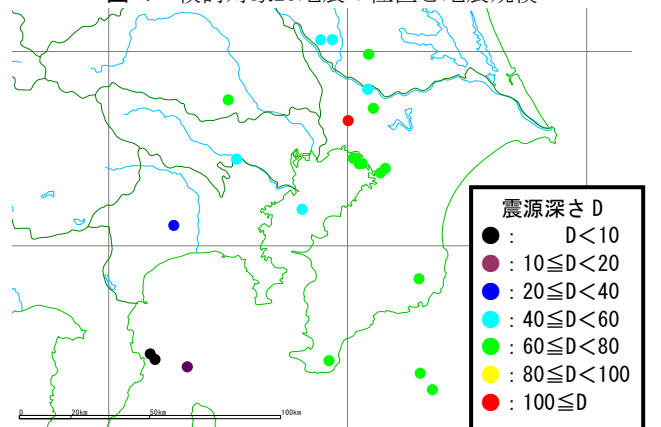


図-2 検討対象25地震の位置と震源深さ

(2) 応答スペクトルの平均増幅度の算出

(1)で選定した対象地震における観測記録の速度応答スペクトル(減衰20%)を算出し, 上述のiz02を基準点として応答スペクトル比を算出し, 地点毎に平均値を算出する. 得られた各点の応答スペクトル比を図-3に示す. 横浜市は18区あるので, 区毎に重ねて示している. 全体的には, 明瞭なピークを示さないが, 0.3秒以下にピークを示す観測点が多

い. このことは, 丘陵上の観測点が多いことを反映していると考えられる. tr07, tt04, sk01, ns04, md04等は比較的明瞭なピークを有している. また, kz01, kz10, ns05等では1秒より長い周期でピークを有している.

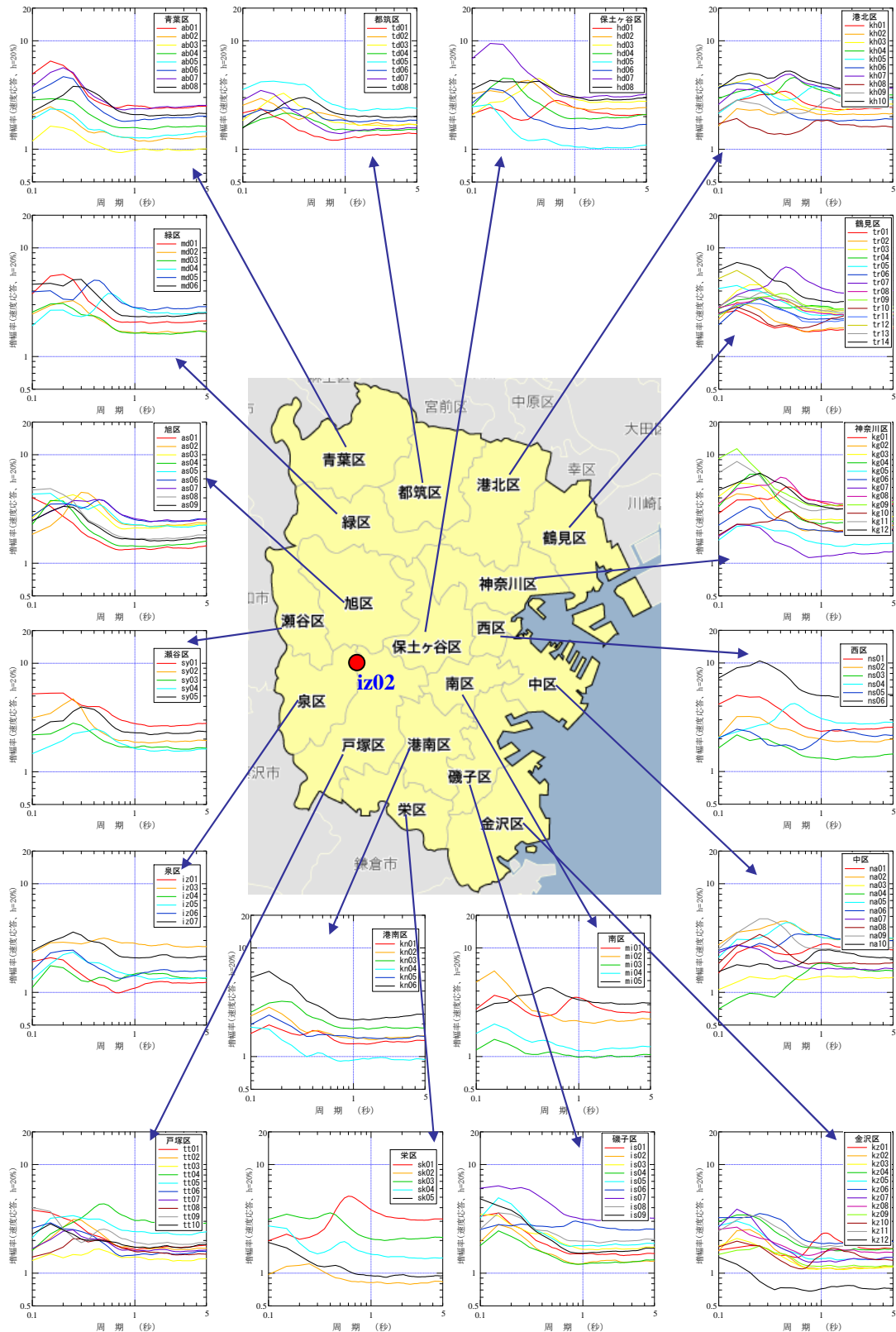


図-3 速度応答スペクトル(減衰20%)の平均増幅度(スペクトル比)

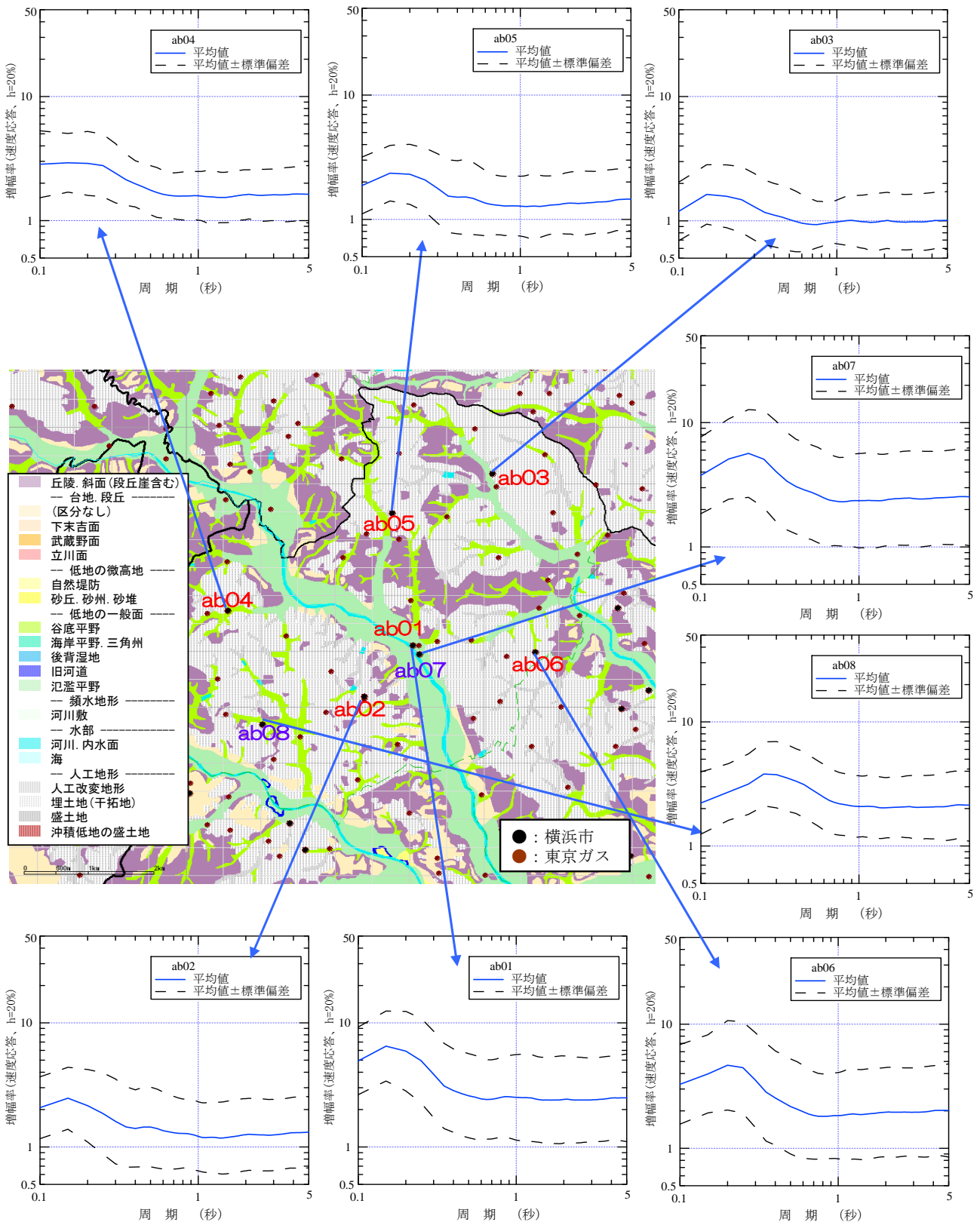


図-4 速度応答スペクトル (減衰 20%) の増幅度【青葉区】

図-4 は、青葉区を例に、分布を地質分類図と重ねて示したものである。どの観測点も AVS20 が 200m/s を越えているので、卓越周期はいずれも 0.3 秒以下である。ばらつきは、概ね 1.5 前後の値を示すものが多く、周期変動もやや 0.3 秒前後で大きい

傾向が見られる程度である。増幅率には低地部で大きいという傾向が見られるが、ばらつきについては特に地形との関係は見られない。

(3) 地盤パラメータと増幅率の関係

応答スペクトルの周期毎の増幅率と、深さ 20m までの平均 S 波速度 (AVS20) 及び深さ 30m までの平均 S 波速度 (AVS30) との関係について、次式で回帰分析を行う。

$$\log_{10} R(S(T)) = A \cdot \log_{10} AVS + B \quad (1)$$

横浜市READY150地点では、標準貫入試験およびPS検層が行われている。本論文では、さらにAVS20とAVS30を精度良く評価するために、伝達関数が適合するように、地盤モデルを修正して用いる。すなわち、PS検層データから作成した地盤モデル(初期モデル)に基づく伝達関数と、応答スペクトルと同

様に算出したフーリエスペクトル比とを比較し、伝達関数がフーリエスペクトル比に合うように、地盤モデルを一部修正している。

地盤モデル修正前後の伝達関数とフーリエスペクトル比の例を、図-5に示す。黒線が地震観測記録の平均フーリエスペクトル比、青線がPS検層の値による一次元重複反射理論による伝達関数、赤線がS波速度を修正したモデルによる理論伝達関数である。地震観測記録の平均スペクトル比は、表-1に示した25地震について算出したiz02に対するフーリエスペクトル比の平均値である。修正により、スペクトル比とよく対応していることがわかる。

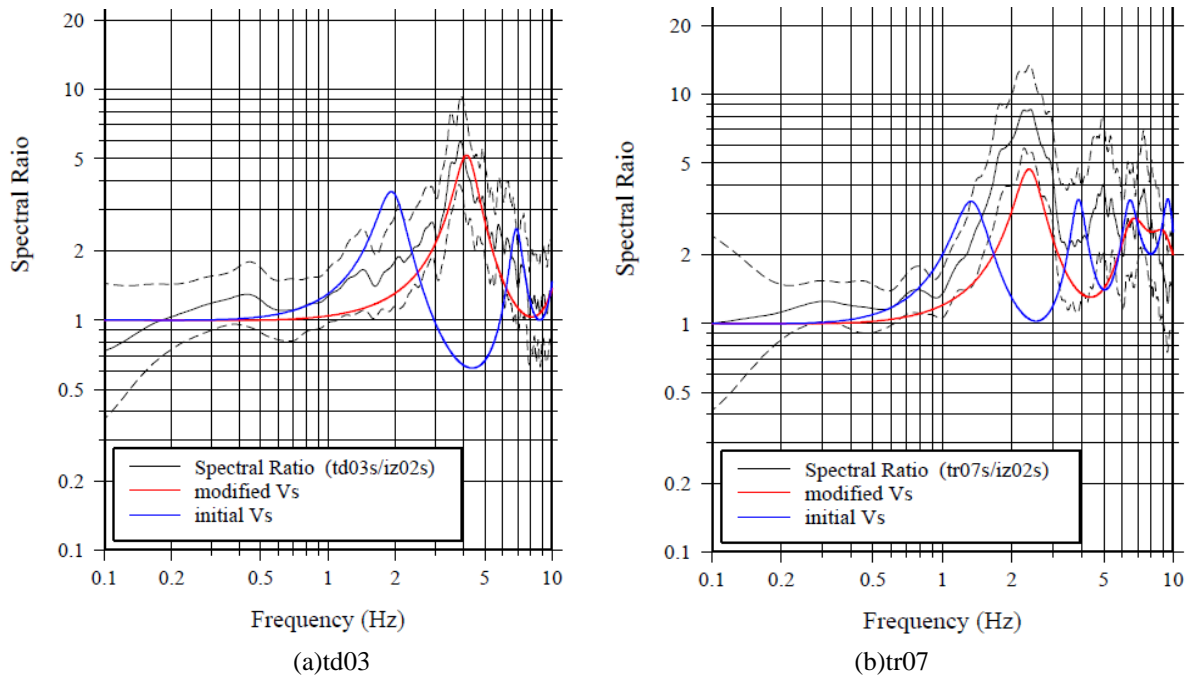


図-5 伝達関数のフィッティングの例

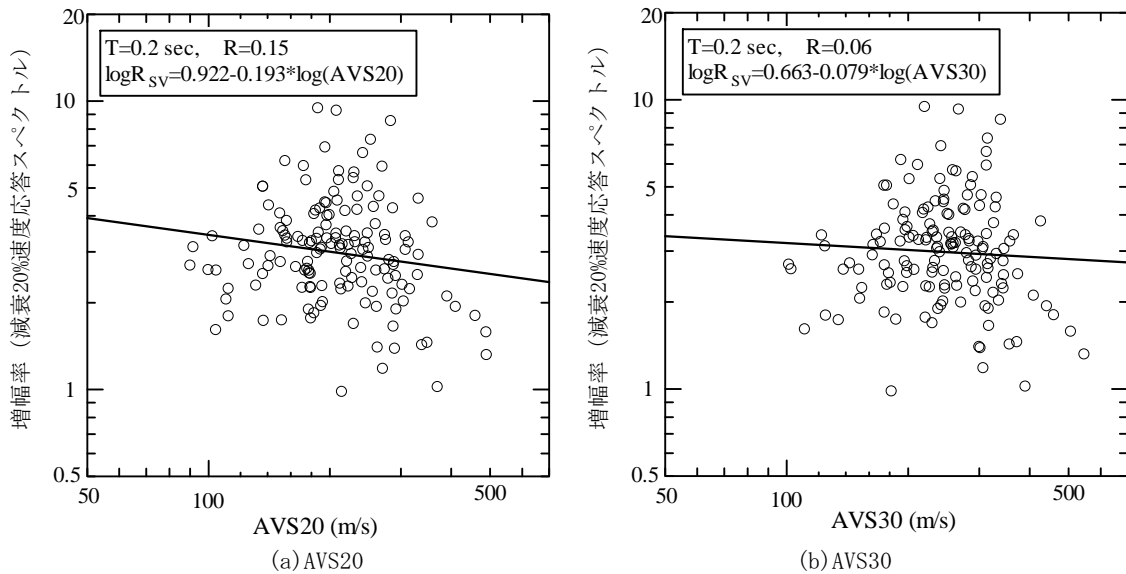


図-6 平均 S 波速度と応答スペクトル増幅率の関係 (周期 0.2 秒)

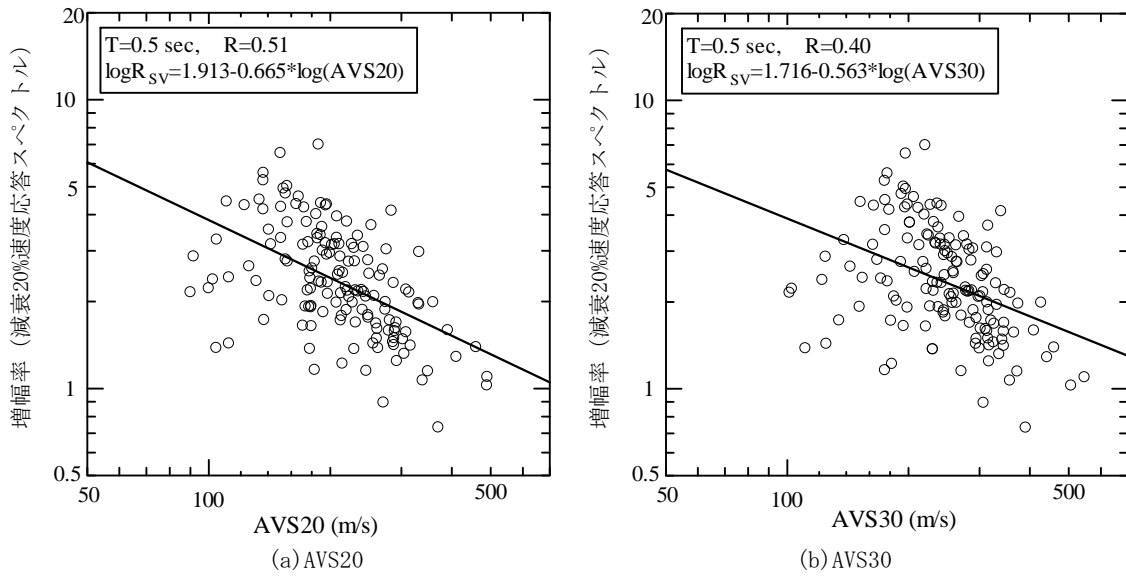


図-7 平均 S 波速度と応答スペクトル増幅率の関係 (周期 0.5 秒)

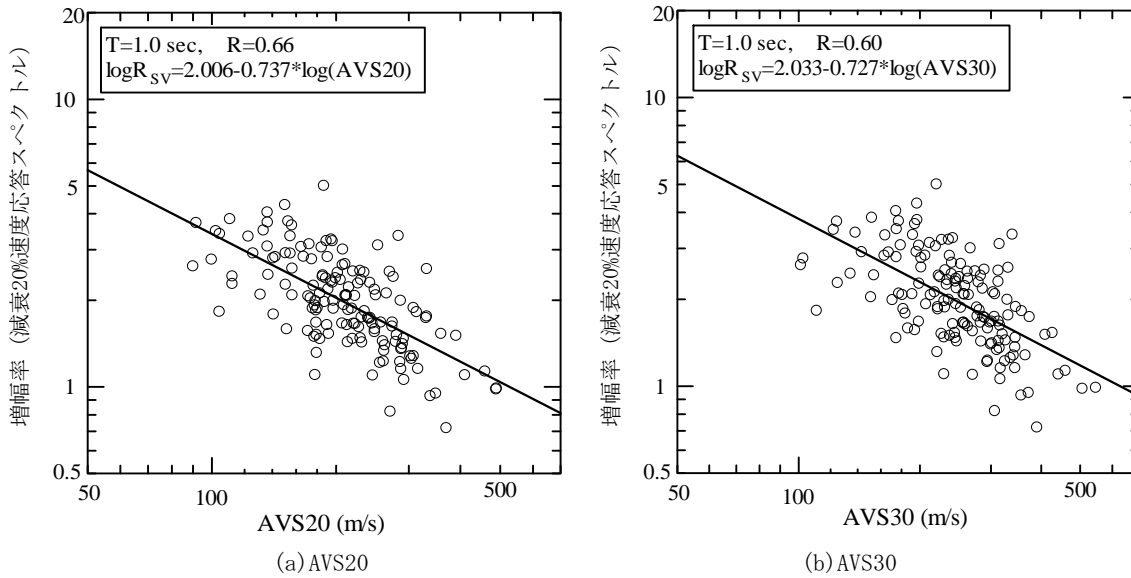


図-8 平均 S 波速度と応答スペクトル増幅率の関係 (周期 1.0 秒)

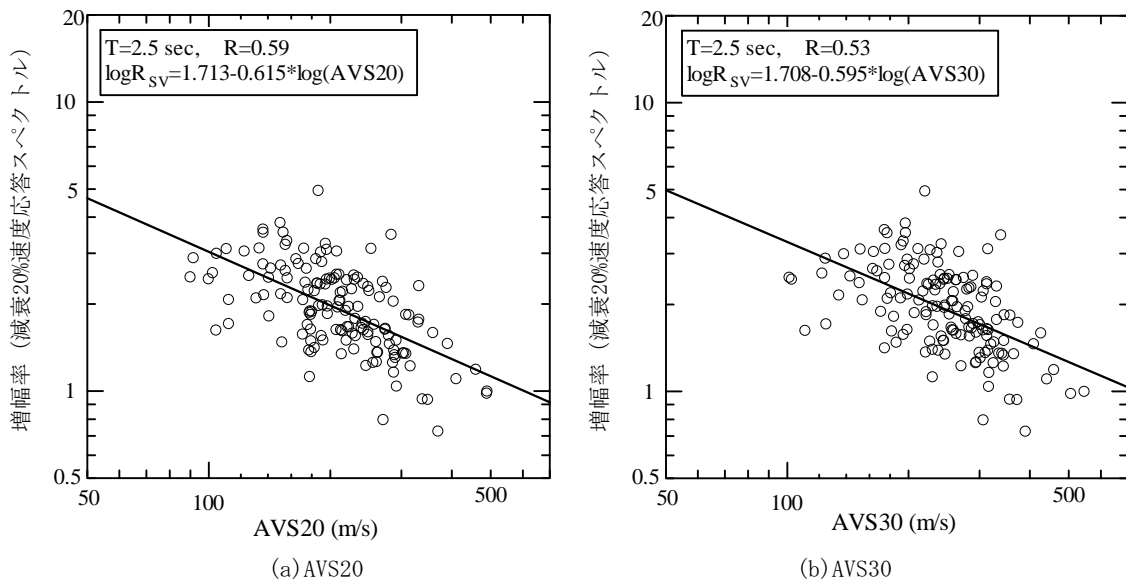


図-9 平均 S 波速度と応答スペクトル増幅率の関係 (周期 2.5 秒)

周期 0.2 秒, 0.5 秒, 1.0 秒, 2.5 秒について, 式(1)により得られた相関関係を図-6~9 に示す. 回帰係数の信頼性を把握するため, 回帰分析での相関係数を図-10 に示す. 周期によって AVS との相関の程度は大きく異なることが分かる. 周期 0.3 秒以下ではほとんど相関は無く, 周期 0.8~1 秒付近で最も相関が高くなっている. SI 値は周期 0.1 秒から 2.5 秒までの積分値であり, 後に示す図-14 のように周期 0.5 秒以下では速度応答の値が小さいので, 0.5 秒以下の成分は SI 値への寄与は小さい. したがって, SI 値を推定するための応答スペクトルとしては十分な信頼性を有していると考えられる.

回帰係数を図-11 に示す. 周期0.8秒前後ではAVSの値によって大きく増幅率が異なる, すなわち感度が高いことがわかる.

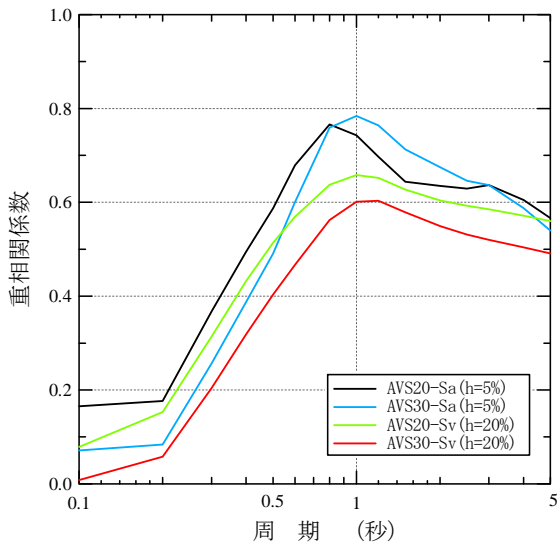
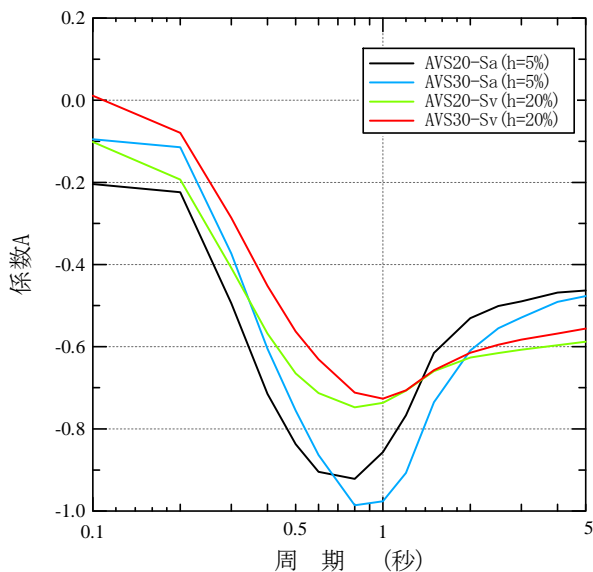
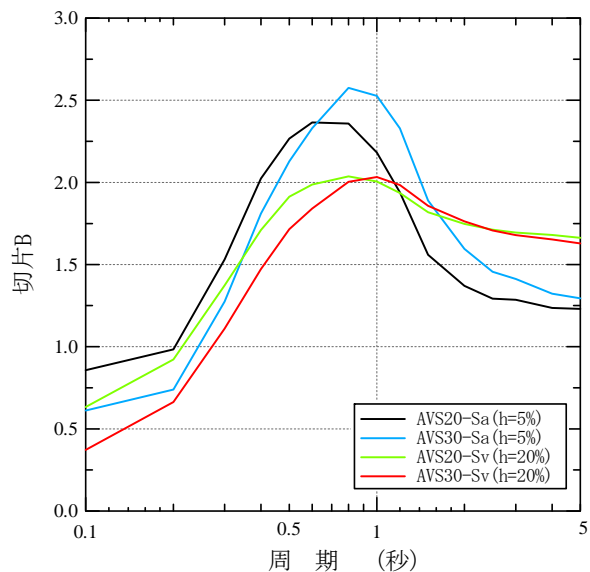


図-10 周期ごとの重相関係数



(a) 回帰係数 A



(b) 回帰係数 B

図-11 各周期における回帰係数

3. 応答スペクトルの空間補間

(1) 補間手法と条件

横浜市観測点を対象として, 2章で算出した観測記録の応答スペクトル比を用いた補間推定による精度の検証を行う. 各区 2 点 (計 36 点) の観測値を用いて, 他の 114 観測点での地震動を補間推定し, 実際の観測値と比較する. 36 観測点は, 気象庁の震度発表に用いられている箇所を選んでいる. 観測点配置を図-12 に示す.

補間推定の手順は, 図-13 に示すように, 地表観測値を地盤増幅度で工学的基盤に割り戻し, 工学的基盤上で補間により対象地点での値を算出し, 対象地点での地盤増幅度を乗じて地表での値を推定するものである. 本論文では, 応答スペクトルを対象としているが, 周期点数ほど同様の計算を繰り返すことで補間推定を行う. 工学的基盤上での補間は, 式(2)に示すように, 距離 r_{ij} の 2 乗の逆数を重みとして補間する. z_j は j 地点の推定値, z_i は i 地点の観測値, r_{ij} は i 地点と j 地点間の距離である.

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{r_{ij}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{ij}^2}} \quad (2)$$

表-2 に示す 6 地震について, 補間推定を行い, 観測値と比較する. 入力地震動特性が異なるものも含めるため, 伊豆半島東方沖での地震も含めている. 図-14 に基準点としている iz02 における対象 6 地震の速度応答スペクトル (減衰 20%) の比較を示す. eq06502 は伊豆の地震ではあるが, eq98502 と異なり短周期成分が卓越している. iz02 では, 厚さ 0.8m の表層の下に $V_s=610\text{m/s}$ の軟岩が現れている.

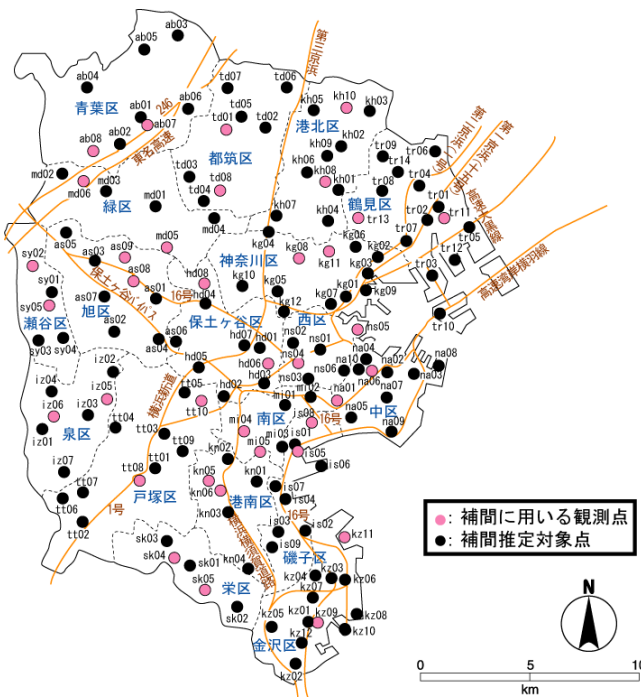


図-12 補間に用いた観測点の配置

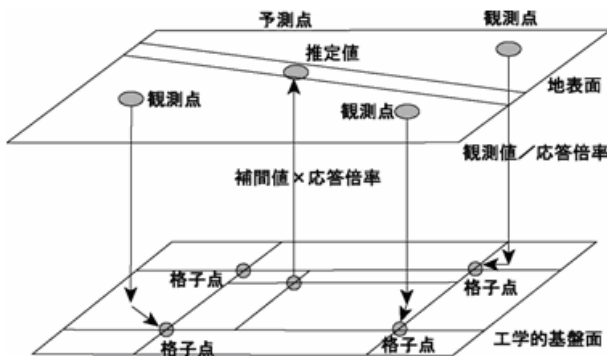


図-13 地盤増幅を考慮した空間補間

表-2 補間推定の対象地震

地震番号	発生年月日	震源域	M_j	深さ (km)
eq98502	1998. 5. 3	伊豆半島東方沖	5.7	3
eq03903	2003. 9. 20	千葉県南部	5.8	70
eq05708	2005. 7. 23	千葉県北西部	6.0	73
eq05x04	2005. 10. 16	茨城県南西部	5.1	47
eq06502	2006. 5. 2	伊豆半島東方沖	5.1	15
eq06808	2006. 8. 31	東京湾	4.8	76

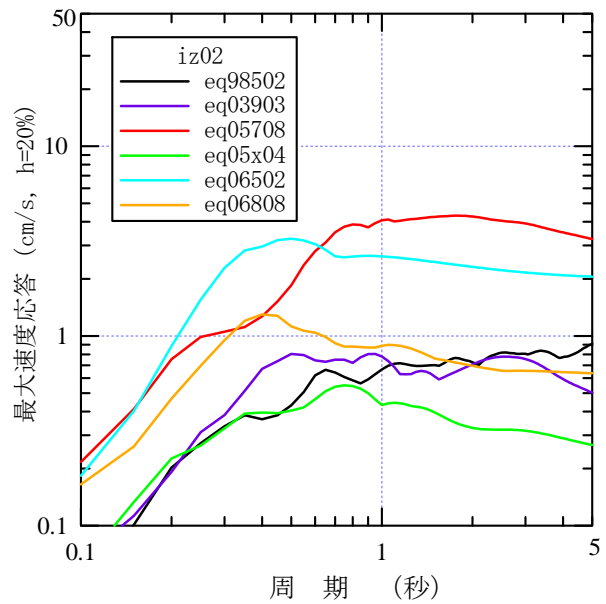
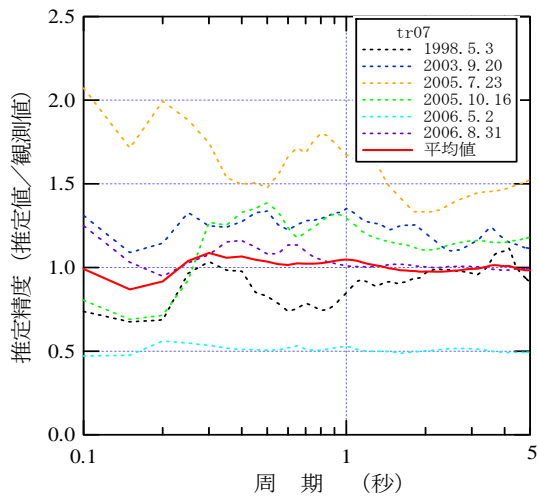


図-14 基準点 iz02 における応答スペクトル

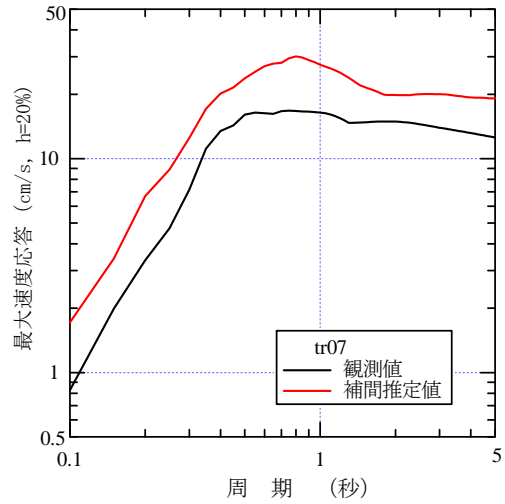
(2) 推定結果

減衰 20%の速度応答スペクトルについて、4 地点における精度を図-15~18 に示す。図(a)は対象 6 地震について、推定値/観測値を精度指標として示したものである。応答スペクトルは各種の周期特性を考慮できるので、赤線で示した平均値は 2 割程度の誤差にとどまっており、高い精度となっている。しかしながら、地震別では、精度がばらついており、かつ地震によってどの地点でも大きいあるいは小さいという傾向が見られるわけでもない。今後、さらなる精度向上のため、この要因も明らかにしたいと考えている。図(b)は、2011 年東日本大震災以前では最も大きな揺れが観測された 2005 年 7 月 23 日に発生した千葉県北西部の地震について、比較したものである。周期による偏りはなく、全体によく観測記録の周期特性が再現されていることが分かる。

図-18(b)と同様に対象地震の中で揺れが最も大きい 2005 年 7 月 23 日の地震を対象として、観測値と推定値のスペクトル比較図の分布を、青葉区、神奈川区について、図-19 に示す。丘陵側の青葉区では場所によるスペクトル形状の差異は大きくないが、低地と丘陵が混在する神奈川区では場所により観測記録のスペクトル形状は大きく異なっている。それでも、推定結果は概ねそれぞれの観測点の特性を反映しており、概ね良い対応を示している。特に、神奈川区については、補間に観測点として用いた kg08 と kg11 の 2 点の応答スペクトルの形状が大きく異なるにもかかわらず、外挿条件になる kg06 でやや差が大きい程度で、他の観測点ではよく周期特性が再現されている。

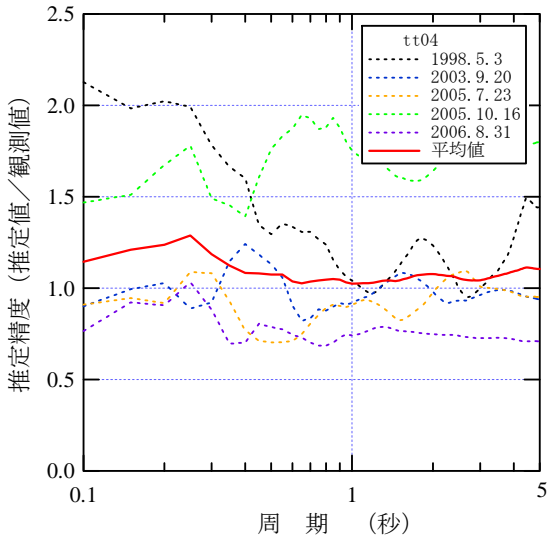


(a) 地震毎の推定精度

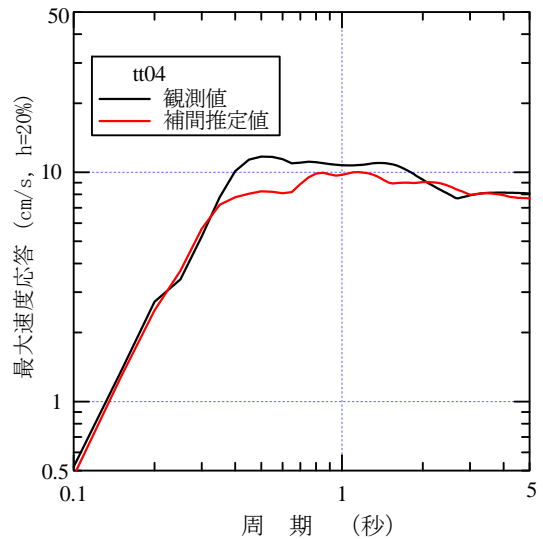


(b) 観測値との比較 (2005年7月23日)

図-15 減衰20%速度応答スペクトルの推定精度 (tr07)

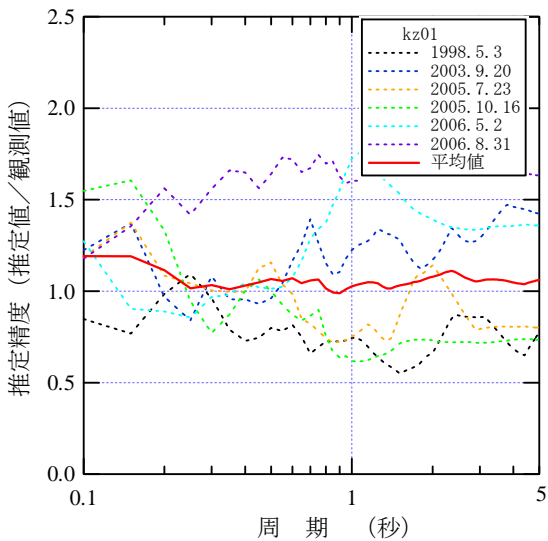


(a) 地震毎の推定精度

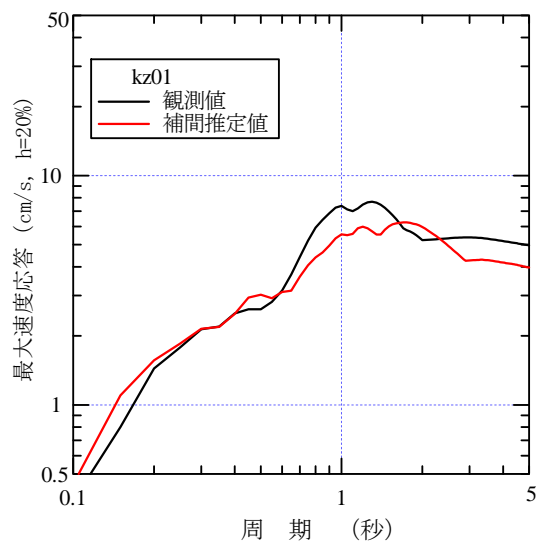


(b) 観測値との比較 (2005年7月23日)

図-16 減衰20%速度応答スペクトルの推定精度 (tt04)

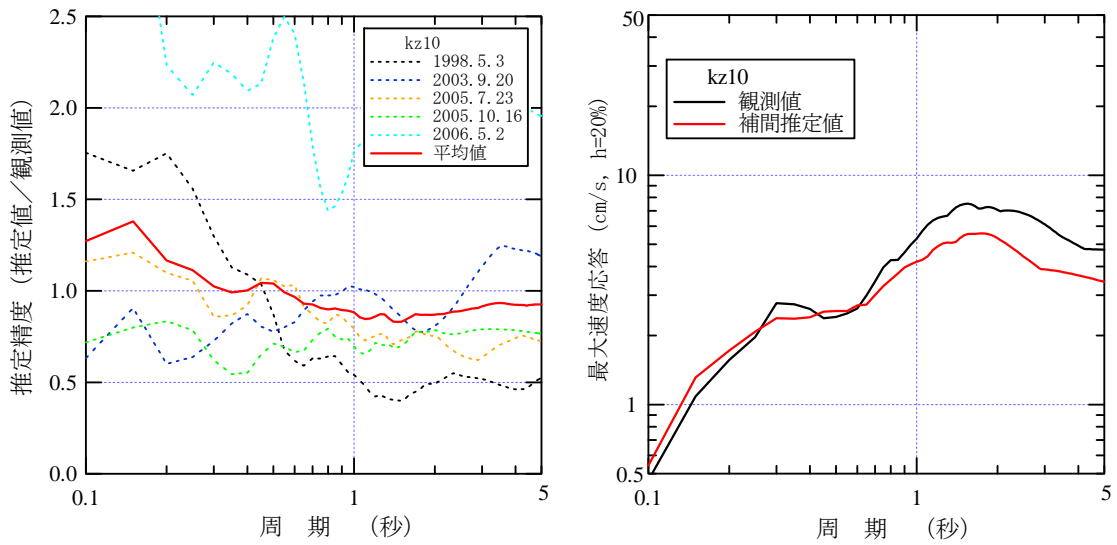


(a) 地震毎の推定精度



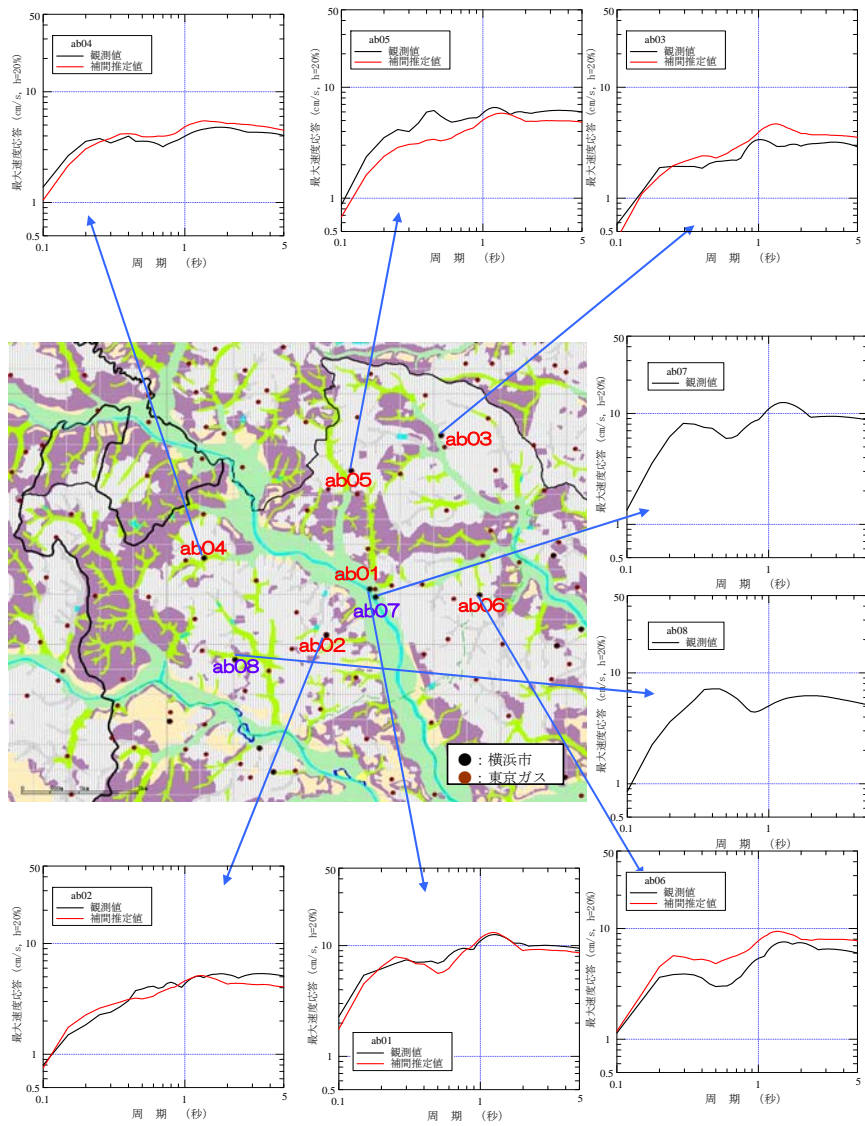
(b) 観測値との比較 (2005年7月23日)

図-17 減衰20%速度応答スペクトルの推定精度 (kz01)



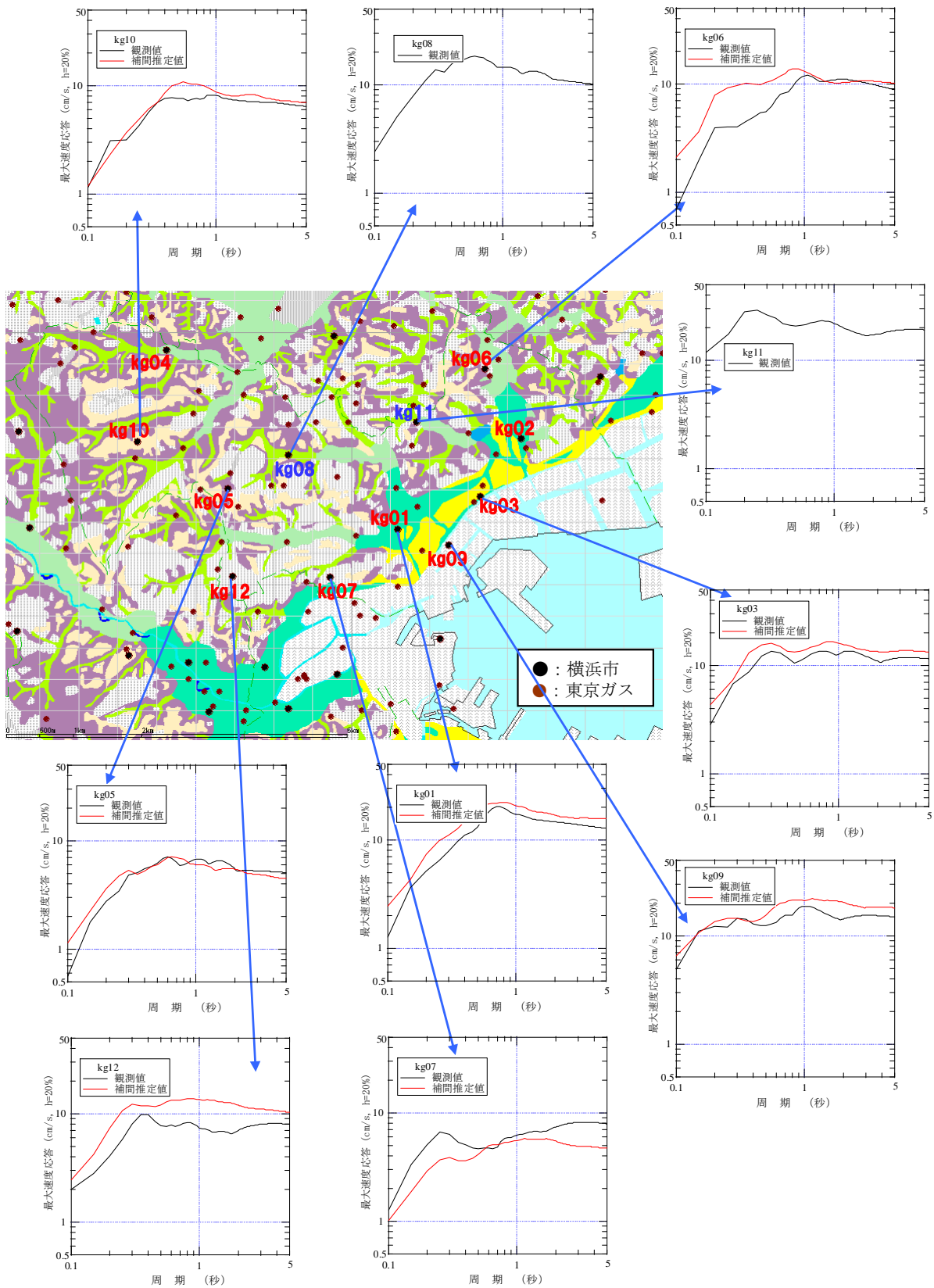
(a) 地震毎の推定精度 (b) 観測値との比較 (2005年7月23日)

図-18 減衰20%速度応答スペクトルの推定精度 (kz10)



(a) 青葉区

図-19(a) 速度応答スペクトル (減衰5%) の推定 (2005年7月23日千葉県北西部の地震)



(b) 神奈川県

図-19(b) 速度応答スペクトル (減衰5%) の推定 (2005年7月23日千葉県北西部の地震)

4. おわりに

本論文では、約2kmの間隔で設置されている横浜市強震観測網の記録を用いて、地震動の高精度推定のため、速度応答スペクトルを対象とした検証を行った。これにより、以下のことが明らかになった。

- 1) 応答スペクトルを扱うことで、地盤の特性や入力地震動の特性を反映した評価ができる。
- 2) 周期0.5秒～2.5秒程度では、応答スペクトルの増幅率と地盤の平均S波速度は良い相関を示す。
- 3) 6地震で検証した結果、応答スペクトルの推定値は概ね観測値と良い対応を示した。

今後、東京ガスの高密度観測網を活かし、地震観測点でない箇所への展開法を検討していく予定である。

謝辞：本論文では、横浜市強震計ネットワーク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) Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y.: Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, *PEER Report 2007/02*, Pacific earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley, 2007.
- 3) 石井晃, 永田茂, 砂坂善雄, 大保直人：多層地盤の非線形増幅特性の簡易評価法, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.1071-1076, 1998.
- 4) 横浜市：高密度強震計ネットワーク
http://www.city.yokohama.jp/me/anzen/kikikanri/jisin_data/
- 5) 翠川三郎, 駒澤真人, 三浦弘之：横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第3号, 2008.

(2011.12.16受付、2012.2.27修正、2012.3.6受理)

PRECISION OF SPATIAL INTERPOLATION ESTIMATION OF RESPONSE SPECTRA USING THE RECORDS OBSERVED BY YOKOHAMA DENSE ARRAY

Iwao SUETOMI, Yasuhiro FUKUSHIMA, Eisuke ISHIDA, Wataru INOMATA, Yuuki NORITO, Fumio YAMAZAKI and Takanobu SUZUKI

SI value is often used as an index of ground motion for disaster estimation. Because source effect and site amplification effect have characteristics which depend on frequency, response spectra are effective in order to calculate the distribution of earthquake ground motion precisely. In the other hand, real-time estimation should be simple. In this paper, using the observation records in Yokohama, response spectra are estimated by the interpolation with the average ratio. It is shown that, 1) response spectrum is effective, 2) average S-wave velocity is well correlated to an amplification factor for the period range from 0.5 to 2.5 second, 3) the use of average ratio of response spectrum gives good estimation of earthquake ground motion.