

気象庁地震記録の距離減衰式に基づく 地点増幅特性と地形分類との関係

大西 淳一¹・山崎 文雄²・若松 加寿江³

¹正会員 修(工) 東海旅客鉄道株式会社 (〒103-0028 東京都中央区八重洲1-6-6)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 博(工) 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

地震被害想定や早期被害推定システムなどにおいて広域の地震動分布を簡便に推定するには、地震のマグニチュードおよび断層面からの距離のほか、表層地盤の増幅特性を考慮する必要がある。国土数値情報の1kmメッシュの土地分類や標高データを利用して、日本の特定の地域における地盤増幅度を推定する研究は既にいくつかなされているが、それらの全国への適用性については詳しく検討されていない。そこで本研究では、全国の気象庁77観測点における地盤増幅度を距離減衰式の地点係数より求め、地盤条件との関係を検討することにより、国土数値情報のみから全国の任意地点の最大加速度、最大速度および計測震度に対する増幅度を簡便に推定する手法を提案し、既往の研究と比較検討した。

Key Words: amplification ratio, geomorphological land classification, Digital National Land Information, PGA, PGV

1. はじめに

地震動分布の推定は、地震発生前の耐震設計・耐震補強や防災態勢の整備、地震発生直後の被害推定や緊急対応、あるいは地震被害データの分析などにおいて重要である。とくに、地震被害想定^{1,2)}や早期被害推定システム^{3,4)}などへの利用を考えると、広域の地震動分布を一般に入手可能なデータに基づいて簡便に推定する手法が望まれる。

地震動の大きさを左右する主な要因としては、マグニチュードで代表される震源特性、断層面からの距離で代表される伝播経路、それに増幅率で代表される表層地盤の影響が挙げられる。地震のマグニチュード、断層面の位置や深さ、それに場合によっては地盤条件をパラメータとして、地震動分布を簡便に推定する方法として距離減衰式があり、地震被害推定や地震危険度解析などに多用されている。Molas and Yamazaki^{5,7)}およびShabestari and Yamazaki⁸⁾は、最近、気象庁87型強震計による観測記録を用いて、最大加速度、最大速度、応答スペクトル、計測震度の距離減衰式を構築しており、本研究では、これら距離減衰式における観測地点の相対的な揺れ易

さを表わす地点係数を地盤特性の参照データとして用いる。

地盤の増幅特性を既往のデータから簡易に推定する方法としては、日本全国を1kmメッシュでカバーしている国土数値情報⁹⁾に含まれる地形・地質学的情報を用いる研究が最近幾つか行われている。

松岡・翠川^{10,12)}は、地盤のS波速度を地震動に及ぼす地盤の影響と密接に関係する物理量と考え、1987年千葉県東方沖地震の際に強震記録が得られた47地点について、地表からある深さ d [m]までの地盤の平均S波速度 $AVS(d)$ と、それぞれの地点における最大加速度、最大速度の地盤増幅度を求めた。その結果、第三紀ないしそれ以前の丘陵地に対する最大加速度と最大速度の増幅度が、それぞれ $AVS(10)$ 、 $AVS(30)$ と相関が最も高いことをつきとめ、それぞれの推定式を提案した。また、関東地方の459地点での地盤のS波速度資料と国土数値情報の地形学的情報に基づき、地形・表層地質・標高から $AVS(30)$ を推定する経験式を提案した。これにより、国土数値情報から $AVS(30)$ を介して、最大速度の地盤増幅度を推定することが可能になった。

西阪・福和ら^{13,14)}は、愛知県¹⁵⁾及び名古屋市¹⁶⁾の地

震被害想定において得られた地震動予測結果を利用し、地表と地震基盤(波速度3km相当)の振幅比を地震増幅度と定義して、国土数値情報の標高・地形・表層地質を説明変数とした回帰分析を行い、最大加速度と最大速度について増幅度を直接求める推定式を提案した。この推定式では、加速度の増幅度について地盤の非線形性を考慮したのが特徴である。

以上2つの地盤増幅度の推定手法はいずれも、日本のある特定の地域(関東地方または東海地域)の地盤・地形データに基づいて推定式が構築されている。しかし、これらの手法がそれぞれの地域に対して適用できることは示されているが、日本全国への適用性について充分には検討されていない。このため、大規模地震時における広域の震度分布を求めるためには、日本全国に適用できる推定手法が必要になる。なお現状では、松岡・翠川¹²⁾の方法が国土庁¹⁷⁾や消防庁¹⁸⁾の地震被害推定システムなどで使用されている。

また、従来の体感による震度階に代わって導入された計測震度は、96年10月より気象庁の公式発表にも用いられるようになり、この計測震度を観測する地震計が全国に多数置かれるようになった⁹⁾。今後、計測震度が他の地震動指標値以上に地震防災等多用されると思われるが、計測震度の地盤増幅度についての研究はほとんど行われていない。

このような背景より本研究では、日本全国に適用できる地盤増幅度の推定手法を提案することを目的として、全国の気象庁観測点における地形・地質条件と距離減衰式から求められた地盤増幅度の関係を検討することにより、国土数値情報を利用して最大加速度、最大速度、計測震度の地盤増幅度の推定を行う。

2. 地盤増幅度の推定方法

(1) 距離減衰式と地点係数

Molas and Yamazaki^{6),7)}は気象庁の全国76箇所の87型強震計で、1988年8月1日から1993年12月31日までに観測された387の地震による水平2方向成分2,166組の記録を用いて、最大加速度(PGA , cm/s^2)と最大速度(PGV , cm/s)の距離減衰式を構築した。その後、安中ら¹⁹⁾によって整理されたデータを追加して、Shabestari and Yamazaki⁸⁾は、全国77箇所(図-1)の87型強震計で1988年8月1日から1996年3月31日までに観測された1,020の地震による3,990組の記録を用いて、計測震度(I)の距離減衰式を構築した。また同時に、最大加速度と最大速度の距離減衰式も更新した。回帰分析には、以下の関数型を用いた。

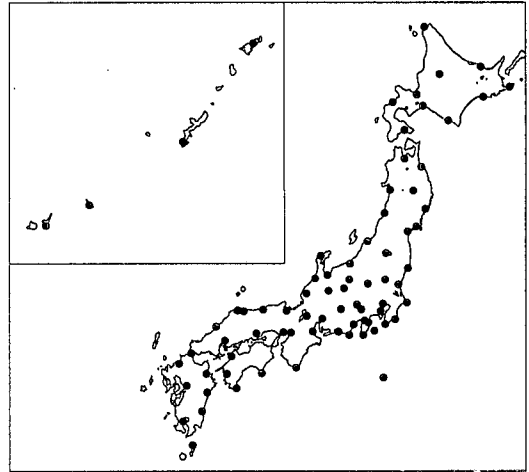


図-1 気象庁87型強震計による地震観測地点

$$\log_{10} PGA = b_0^A + b_1^A M_j + b_2^A r - \log_{10} r + b_4^A h + c_i^A \quad (1)$$

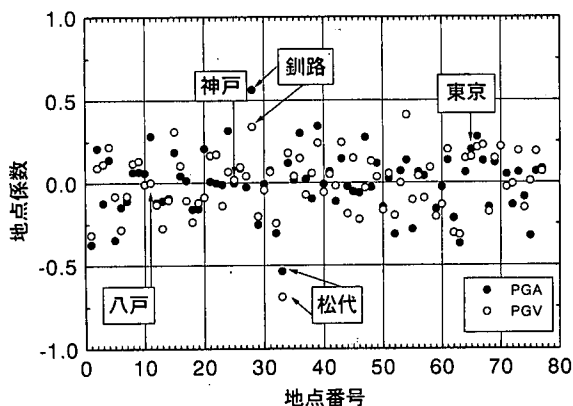
$$\log_{10} PGV = b_0^V + b_1^V M_j + b_2^V r - \log_{10} r + b_4^V h + c_i^V \quad (2)$$

$$I = b_0^I + b_1^I M_j + b_2^I r - 1.89 \log_{10} r + b_4^I h + c_i^I \quad (3)$$

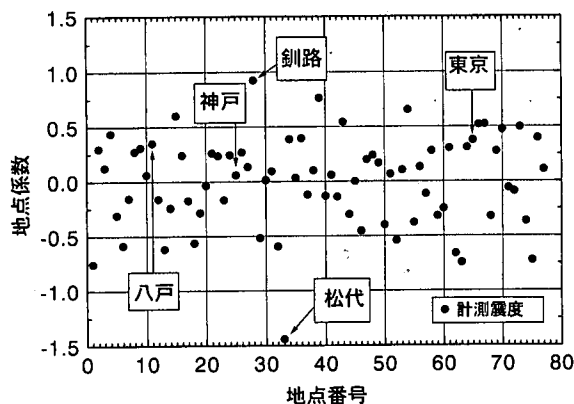
ここで M_j は気象庁マグニチュード、 r は断面への最短距離(km)、 h は震源深さ(km)、各地震動指標の b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_4 は回帰分析により求める係数、 c_i^A 、 c_i^V 、 c_i^I は各指標の地点係数である。

回帰分析の方法としては、マグニチュードと距離の相関の影響が大きいことを考慮して、Joyner and Boore²⁰⁾が最初に使用した2段階回帰を採用した。これは、地震ごとのダミー変数を用いて、第1段階目で距離に関する係数(b_2 、 b_4)を求め、第2段階目でマグニチュードに関する係数(b_0 、 b_1)を求めるものである。Fukushima and Tanaka²¹⁾もこの重要性を指摘しており、最近の距離減衰の研究では一般化した方法といえる。ここで地点係数が地点ごとに異なるため、その分の数のダミー変数も必要となる。その結果、通常の2段階回帰法で回帰係数を求めようとすると、ダミー変数が多くなり過ぎ、マトリックスが特異となり解が求まらない。この問題を解決するため、繰り返し部分回帰法と名付けた3段階回帰法⁹⁾を開発し、この方法によって係数を求めた。

地点係数は、距離減衰式の補正項として導入した地点ごとの揺れやすさを表す係数で、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる。全観測点の地点係数の平均値は0であり、地点係数が正の地点は平均より揺れやすいことを、また負の地点は揺れにくいことを表している。



(a) 最大加速度・最大速度



(b) 計測震度

図-2 各地震動指標の地点係数

表-1に77箇所の気象官署の地点係数を一覧する。また、図-2にこれらの地点係数を地点番号(表-1)に対して図示する。最大加速度と計測震度が相対的に最も大きくなるのは釧路気象台であり、最も小さくなるのは松代観測所である。釧路は、以前より大きな加速度が記録されることで知られたところで、本解析によってもこの事実が裏付けられた。また松代観測所は、ここだけ岩盤のトンネル内に地震計が設置されており、このため最も揺れが小さくなるものと思われる。最大速度の地点係数も、最大加速度のものと同様の傾向を示しており、最も揺れやすい地点は酒田、最も揺れにくいのは松代である。

地点係数を決定する要因として最も大きいものは地盤条件であると考えられる。そこでまず、地点係数を地盤増幅度に換算する方法について検討する。

(2) 地点係数から地盤増幅度への換算

地点*i*の地表面および地点*i*直下の解放基盤面における最大加速度をそれぞれ PGA_{Si} および PGA_{Bi} とすると、地点*i*の最大加速度に関する地盤増幅度 ARA_i は、下式で与えられる。

$$ARA_i = PGA_{Si} / PGA_{Bi} \quad (4)$$

ここで、本研究では基盤面を工学的に十分な硬さを有する層(例えば、平均S波速度400m/s以上)の上面と考え、この面における最大加速度を推定するための距離減衰式の補正項(地点係数)は地点によらず一定と仮定し c'_0 と表す。よって、解放基盤面における最大加速度 PGA_{Bi} は式(1)から

$$\log_{10} PGA_{Bi} = b'_0 + b'_1 M_j + b'_2 r - \log_{10} r + b'_4 h + c'_0 \quad (5)$$

と推定される。また地表面における最大加速度 PGA_{Si} は、

$$\log_{10} PGA_{Si} = b'_0 + b'_1 M_j + b'_2 r - \log_{10} r + b'_4 h + c'_i \quad (6)$$

で与えるものとする。式(5)と式(6)の差をとると、

$$\log_{10} (PGA_{Si} / PGA_{Bi}) = c'_i - c'_0 \quad (7)$$

となり、これを式(4)に代入すると下式となる。

$$ARA_i = 10^{c'_i - c'_0} \quad (8)$$

最大速度の地盤増幅度についても同様に、

$$ARV_i = 10^{c''_i - c''_0} \quad (9)$$

で求める。計測震度の地盤増幅度についても同様の操作を行うと

$$ARI_i = c'_i - c'_0 \quad (10)$$

となる。

以上の式(8),(9),(10)により、最大加速度、最大速度、計測震度それぞれの地点係数から、それぞれの地盤増幅度を求めることができる。なお、地盤増幅度は、とくに最大加速度について地盤の非線形性が大きくなるような範囲については、入力動の大きさに依存することが知られている。しかし、本研究は観測記録に基づく距離減衰式を基礎としており、使用したデータの中に非線形性が現れているものがほとんどないために、この影響を取り入れることは難しい。

次に、地震観測点以外の任意の地点や地域における地点係数を推定する方法を考える。前述のように、地点係数は地盤条件の影響が最も大きいと考えられることから、以下では地点係数と地盤条件の関係について検討を行う。

表-1 77 気象官署の地点係数、地形・地質条件、地盤種別および本研究による分類

No	観測点名	標高 (m)	距離減衰式の地点係数			地質時代	地形分類	岩石区分	表層地質 (卓越する順)	地盤 種別	本研究 による 11分類
			最大 加速度	最大速度	計測震度						
1	Abashiri	38	-0.374	-0.316	-0.756	更新世 ^{*1}	段丘	未固結堆積物	砂礫・火山灰	2	7
2	Ajiro	68	0.209	0.091	0.297	新第三紀	山地	崖錐	玄武岩	1	11
3	Akita	2	-0.124	0.114	0.123	完新世 ^{*2}	三角州性低地	未固結堆積物	泥	4	3
4	Aomori	3	0.140	0.218	0.438	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	4	4
5	Asahikawa	112	-0.347	-0.082	-0.310	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
6	Ashizuri	32	-0.148	-0.285	-0.587	不 明	山地	火山性岩石	閃長岩	1	11
7	Choshi	28	-0.111	-0.080	-0.156	更新世	台地	未固結堆積物	砂・ローム	2	7
8	Fukui	10	0.064	0.117	0.270	完新世	氾濫原	未固結堆積物	泥	4	3
9	Fukuoka	14	0.066	0.132	0.309	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	3	4
10	Hachiojima	80	0.059	-0.010	0.060	更新世	火山山麓地	火山性岩石	火山砕屑物	2	10
11	Hachinohe	28	0.282	0.000	0.348	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫・火山灰	2	7
12	Hakodate	35	-0.121	-0.133	-0.163	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫・火山灰	2	7
13	Hamada	21	-0.111	-0.277	-0.619	新第三紀	山地	火山性岩石	安山岩質岩石	1	11
14	Hamamatsu	33	-0.094	-0.107	-0.244	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫	2	7
15	Hikone	87	0.184	0.310	0.602	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	泥	4	3
16	Hiroshima	-4	0.041	0.103	0.239	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂・粘土	4	4
17	Iida	484	0.013	-0.109	-0.175	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫	2	7
18	Irozaki	55	-0.162	-0.239	-0.564	新第三紀	丘陵	火山性岩石	火山岩類	1	9
19	Ishigakijima	6	-0.160	-0.122	-0.287	更新世	台地	未固結堆積物	琉球石灰岩	2	8
20	Ishinomaki	44	0.206	-0.089	-0.037	新第三紀	丘陵地	固結堆積物	礫岩	1	9
21	Kagoshima	6	0.008	0.164	0.258	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	4	4
22	Kanazawa	0	-0.005	0.171	0.233	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	泥	4	3
23	Katsura	10	-0.013	-0.141	-0.170	完新世	砂丘	未固結堆積物	砂	3	2
24	Kawaguchiko	860	0.315	0.067	0.241	更新世	火山山麓地	火山性岩石	溶岩流	1	10
25	Kobe	59	-0.005	0.017	0.057	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫・砂・粘土	2	7
26	Kofu	274	0.086	0.095	0.266	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
27	Kumamoto	39	-0.028	0.040	0.133	更新世	台地	火山性岩石	火山灰・溶岩	2	6
28	Kushiro	33	0.562	0.339	0.924	更新世	台地	火山性岩石	火山灰・砂	2	6
29	Maebashi	112	-0.255	-0.205	-0.518	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
30	Maizuru	3	-0.009	-0.045	0.012	完新世	埋立地	未固結堆積物	砂	3	1
31	Matsue	21	0.074	0.065	0.092	新第三紀	丘陵	半固結堆積物	砂岩	1	9
32	Matsumoto	610	-0.308	-0.246	-0.596	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
33	Matsushiro	431	-0.537	-0.690	-1.443	不 明	山地	固結堆積物	泥岩	1	11
34	Matsuyama	34	0.119	0.179	0.385	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
35	Mishima	22	0.015	0.040	0.031	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
36	Mito	30	0.299	0.148	0.394	更新世	台地	火山性岩石	ローム・砂礫	2	6
37	Miyakojima	41	0.020	-0.074	-0.124	更新世	台地	未固結堆積物	琉球石灰岩	2	8
38	Miyazaki	7	-0.098	0.057	0.099	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫	2	7
39	Morioka	154	0.343	0.241	0.763	更新世	台地	半固結堆積物	砂礫	2	7
40	Murotomisaki	186	-0.009	-0.058	-0.135	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫・泥	2	7
41	Nagoya	56	0.068	0.050	0.058	更新世	丘陵	半固結堆積物	砂礫	1	9
42	Naha	28	-0.115	-0.019	-0.142	新第三紀	台地	固結堆積物	泥岩	1	8
43	Naze	4	0.145	0.244	0.543	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	粘土・砂礫	4	3
44	Nemuro	26	-0.025	-0.189	-0.303	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫・火山灰	2	7
45	Niigata	3	-0.055	0.149	-0.001	完新世	埋立地	未固結堆積物	砂	4	1
46	Nobeoka	20	-0.063	-0.223	-0.455	古第三紀	山地	固結堆積物	頁岩	1	11
47	Ofunato	37	0.275	-0.032	0.198	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫	1	7
48	Oita	5	-0.029	0.131	0.237	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂・泥	4	4
49	Okayama	17	0.116	0.034	0.165	完新世	氾濫原	未固結堆積物	粘土	4	3
50	Omaezaki	45	-0.148	-0.168	-0.400	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫	2	7
51	Onahama	5	0.023	0.054	0.065	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	4	4
52	Osaka	13	-0.313	-0.199	-0.542	更新世	台地	未固結堆積物	砂礫	2	7
53	Oshima	76	0.069	-0.002	0.102	更新世	火山山麓地	火山性岩石	溶岩流	2	10
54	Sakata	4	0.135	0.411	0.654	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	泥	4	3
55	Sapporo	17	-0.284	-0.105	-0.378	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
56	Sendai	37	0.063	0.039	0.130	更新世	台地	半固結堆積物	砂礫	2	7
57	Shimonoseki	18	0.091	0.091	0.277	完新世	埋立地	未固結堆積物	砂	3	1
58	Shionomisaki	74	0.040	-0.094	-0.117	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫	2	7
59	Shizuoka	14	-0.161	-0.207	-0.318	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
60	Suttsu	33	-0.029	-0.136	-0.249	新第三紀・完新世	台地	火山性岩石	安山岩質岩石・溶岩	2	8
61	Takada	15	0.135	0.200	0.302	更新世	段丘	未固結堆積物	砂礫・泥・砂	2	7
62	Takayama	561	-0.217	-0.306	-0.661	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
63	Tanegashima	18	-0.371	-0.317	-0.744	古第三紀	台地	固結堆積物	砂岩	1	8
64	Tateyama	6	0.061	0.148	0.308	完新世	砂州間低地	未固結堆積物	砂・泥	3	2
65	Tokyo	21	0.198	0.155	0.375	更新世	台地	火山性岩石	ローム	2	6
66	Tomakomai	7	0.277	0.213	0.519	更新世	台地	火山性岩石	火山灰	2	6
67	Tottori	14	0.131	0.227	0.521	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	泥	4	3
68	Toyama	10	-0.150	-0.179	-0.323	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫・砂・泥	3	5
69	Tsu	-1	0.120	0.147	0.273	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	4	4
70	Urakawa	30	0.216	0.218	0.473	更新世	台地	火山性岩石	火山灰	2	6
71	Utsunomiya	121	0.049	-0.028	-0.062	更新世	台地	半固結堆積物	砂礫・ローム	2	7
72	Uwajima	94	0.084	0.067	0.106	中生代	丘陵	固結堆積物	砂岩・泥岩互層	1	9
73	Wajima	7	-0.137	-0.008	-0.093	完新世	三角州性低地	未固結堆積物	砂	3	4
74	Wakamatsu	212	-0.324	0.008	-0.725	完新世	扇状地性低地	未固結堆積物	砂礫	3	5
75	Wakkanai	11	0.061	0.192	0.494	完新世	埋立地	未固結堆積物	砂	4	1
76	Yokohama	38	-0.088	-0.154	-0.367	更新世	段丘	火山性岩石	ローム・泥・砂・砂礫	2	6
77	Yonago	7	0.067	0.189	0.395	完新世	砂州	未固結堆積物	砂・砂礫	3	2

*1 更新世：工学でいう洪積世をさす。*2 完新世：工学でいう沖積世をさす。

表-2 土地分類基本調査等により得られる主な土地分類項目

地形分類	地質時代	岩石区分	表層地質
山地 火山山麓地 丘陵地 台地 段丘 扇状地性低地 砂州 砂丘 砂州間低地 三角州性低地 氾濫原 埋立地	古生代 中生代 古第三紀 新第三紀 更新世(洪積世) 完新世(沖積世)	変成岩類 深成岩類 火山性岩石 固結堆積物 半固結堆積物 未固結堆積物	各種岩類 砂礫・礫 砂・砂がち 泥・泥がち 粘土 それらの互層 火山灰・ローム 溶岩流 火山砕屑物

3. 地盤条件と地点係数の関係

(1) 気象庁観測点の地盤条件

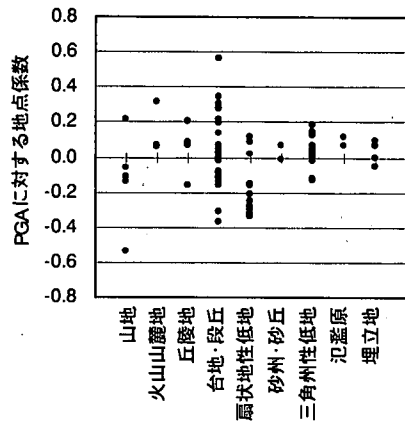
気象庁地震観測点の地盤条件と地点係数の関係を明らかにするためには、まず77観測点の地盤条件を調べる必要がある。全国47都道府県に広く分布する観測点の地盤情報を得るには、前述の国土数値情報に含まれる地形・地質データを利用することが考えられる。しかし、国土数値情報の地形、表層地質データは、縮尺1/20万分(東京都と神奈川県のみ1/10万)の領域表示の地形分類図および表層地質図に基づき、国土地理院による基準地域メッシュ(約1km四方)ごとにメッシュ内で最も広い面積を占める地形・表層地質区分をそのメッシュに対する属性として与えられている。従って、極めて広い地域の地形・地質の平面的分布をマクロに把握するには有効であるが、地震観測点のような特定の地点の地形・地質条件を調べる場合は、メッシュ表示の国土数値情報では誤判定される可能性がある。

そこで、観測点の土地分類については他の手段を使って個別に調べることにした。ここでは、経済企画庁および各都府県より発行されている領域表示の土地分類基本調査^{22)・55)}による表層地質図および地形分類図等をもとに、表-2に示す地形分類、地質時代、岩石区分、表層地質を判定した。その結果を表-1に併せて一覧する。

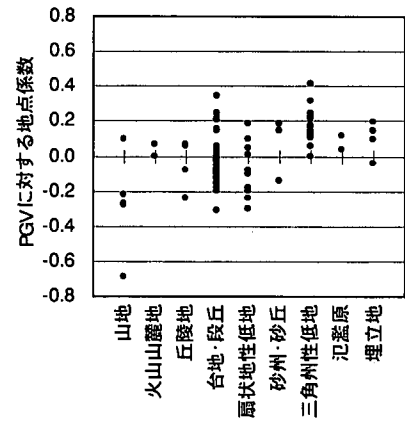
(2) 土地分類と地点係数の関係

気象庁観測点の土地分類と最大加速度、最大速度および計測震度の地点係数との関係を検討した。

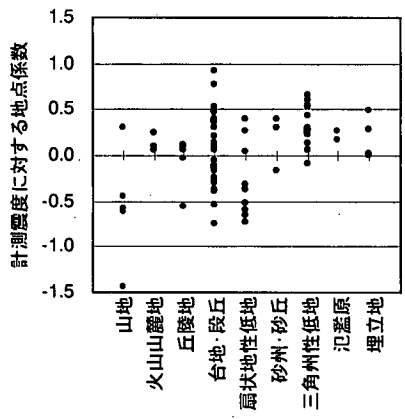
図-3(a)-(c)に最大加速度、最大速度、計測震度の地点係数と地形分類との関係を示す。最大速度、計測震度については、横軸で左へ行くほど、つまり硬い地盤で構成される地形分類ほど地点係数が小さくなる傾向が認められる。しかし、同一の地形分類内でも地点係数はかなりばらついており、地形分類のみが地点係数の支配要因ではないと推察される。



(a) 最大加速度

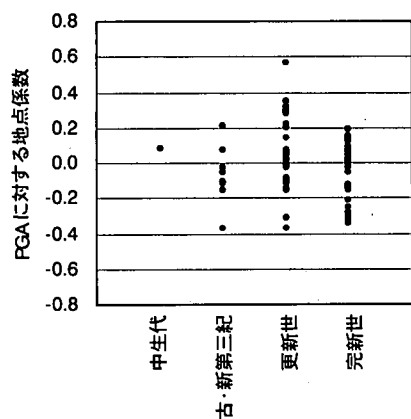


(b) 最大速度

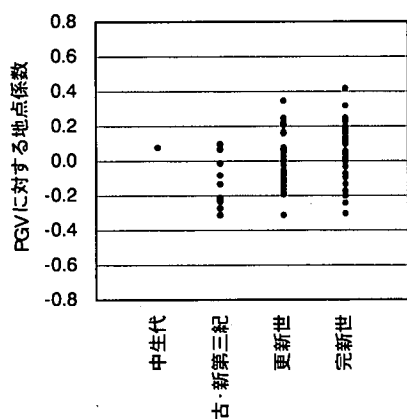


(c) 計測震度

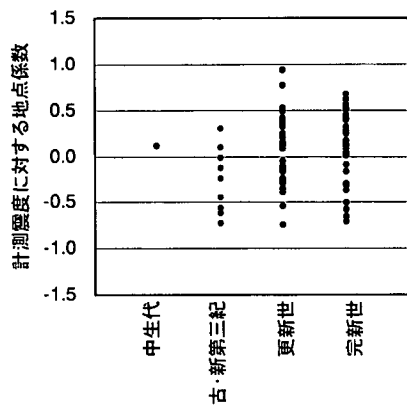
図-3 地点係数と地形分類の関係



(a) 最大加速度

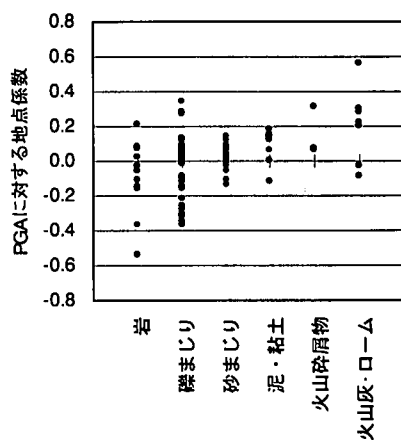


(b) 最大速度

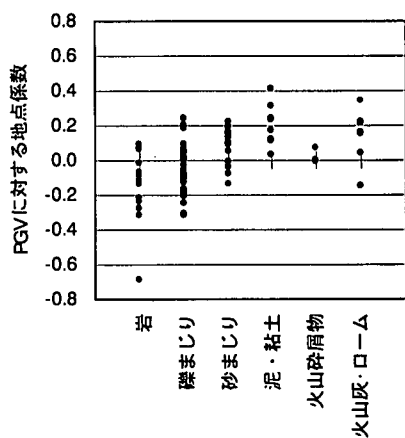


(c) 計測震度

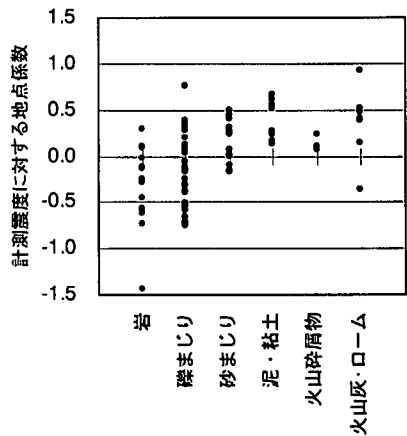
図-4 地点係数と地質時代の関係



(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) 計測震度

図-5 地点係数と表層地質の関係

表-3 地点係数のグループ内平均値と実際値の相関係数

分類方法	最大加速度 の地点係数	最大速度 の地点係数	計測震度 の地点係数
地形分類	0.43	0.61	0.57
地質時代	0.22	0.36	0.30
表層地質	0.47	0.64	0.61

ばらつきの理由としては、1) 地震計の設置条件、深い地盤構造の影響など地形分類以外の要因による影響が大きい；2) 山地など同一地形分類内の観測点の数が特に少ないものについては、これらの観測点が各地形に対応する標準的な地盤条件を呈していない可能性がある；3) 台地・段丘などでは同一地形分類でも地質条件に大きな差異がある；などの理由が考えられる。地点係数のばらつきが大きい地形についてはさらに細かい分類を行い、ばらつきの小さい分類を見いだす必要があると思われる。

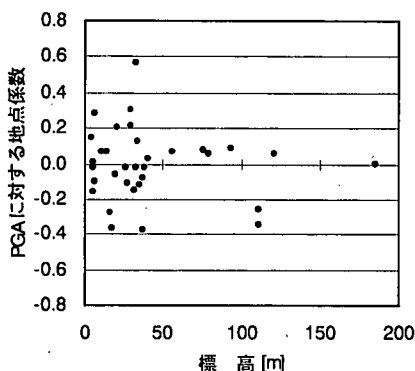
図-4(a)-(c)に地質時代と3つの指標の地点係数との関係を示す。いずれの指標に関しても、相関がほとんど見られず、地質時代のみを説明変数として地点係数を推定することは難しいと言える。

図-5(a)-(c)に表層地質と3つの指標の地点係数との関係を示す。横軸の表層地質は表-1に示した地質の中から最も卓越するものを代表させた。また、溶岩は火山碎屑物の一種であることから火山碎屑物に含めた。ロームは火山灰の一種であることから両者を統合した。図より、いずれの地点係数も、「岩」「砂まじり」「砂まじり」「泥・粘土」の順(粒子が細くなる順)、すなわち、地盤が軟らかくなるほど増幅特性が大きくなる傾向が認められる。

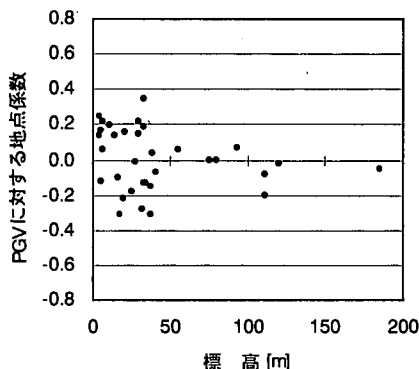
地形分類、地質時代、表層地質の3種類の土地分類による同一のグループ内での地点係数の平均値と実際の地点係数の相関係数を表-3に示すが、最大加速度、最大速度、計測震度のいずれの地点係数も表層地質による分類との相関係数が最も大きく、地形による分類がこれに次いでいる。

(3) 標高と地点係数の関係

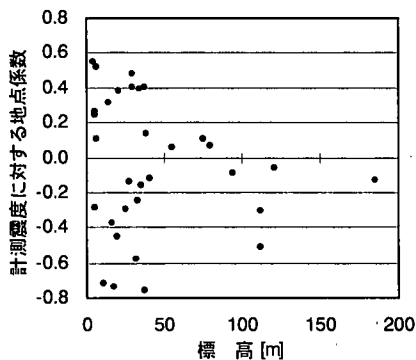
松岡・翠川¹²⁾、西阪・福和ら^{13),14)}は、地盤増幅度を推定する際に標高を考慮していることから、本研究でも観測点の標高と各種地点係数の関係を検討した。その際、標高以外の条件の影響をなるべく取り除くために、地形分類ごとに地点係数と標高の関係を整理した。図-6(a)-(c)に一例として、台地・段丘と分類される観測点における地点係数と標高の関係を示すが、両者の相関はほとんど認められない。台地・段丘以外についても同様な検討を行ったが、いずれも相関はほとんど見られなかった。この理由としては、以下のことが考えられる。



(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) 計測震度

図-6 台地・段丘上の観測点における地点係数と標高の関係

表-4 4種に分類した地盤種別⁵⁸⁾

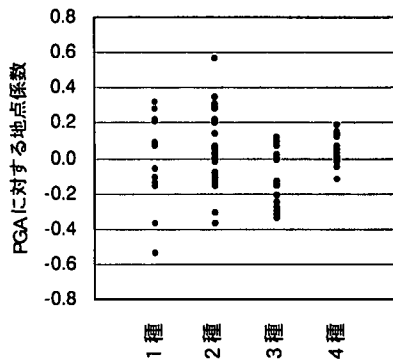
区分	地盤種別	地盤の特性値
1種	(1) 第三紀以前の地盤(以下,岩盤と称する) (2) 岩盤までの洪積層の厚さが10m未満	$T_G < 0.2 \text{ sec}$
2種	(1) 岩盤までの洪積層の厚さが10m以上 (2) 岩盤までの沖積層の厚さが10m未満	$0.2 \leq T_G < 0.4 \text{ sec}$
3種	沖積層の厚さが25m未満かつ軟弱層の厚さが5m未満	$0.4 \leq T_G < 0.6 \text{ sec}$
4種	上記以外の地盤	$T_G \geq 0.6 \text{ sec}$

松岡・翠川および西阪・福和らの研究は、前述のように、それぞれ関東地方と愛知県を対象として行われたものである。上記のような一つの河成平野内で見ると、同一の地形でも河川の上流と下流では堆積物の構成が変化している^{56),57)}。例えば、一つの扇状地でも下流にいくほど堆積物は細粒になることが指摘されている⁵⁷⁾。このことから松岡・翠川¹⁴⁾は河川の上流下流による堆積物の性状の変化の影響を、標高をパラメータとして考慮している。しかし、本研究のように全国、すなわち不特定多数の河川流域を対象とした場合は、上記の地形学的原則が当てはまらない。

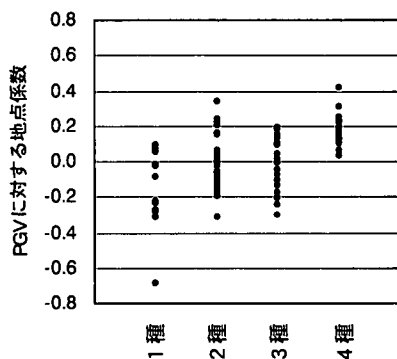
(4) 地盤種別と地点係数の関係

従来、工学分野では地盤条件の分類方法として、地盤種別による分類が多く用いられている。そこで、ここでは表-4に示す4分類による地盤種別⁵⁸⁾と地点係数の関係を検討した。気象庁77観測点における地盤種別は主として地形分類から判定したが、3種地盤と4種地盤の判別にはボーリングデータが必要である。そこで、ボーリングデータにより沖積層の厚さが25m以上であることが確認できた地点については4種地盤とし、それ以外のものは3種地盤とみなした。

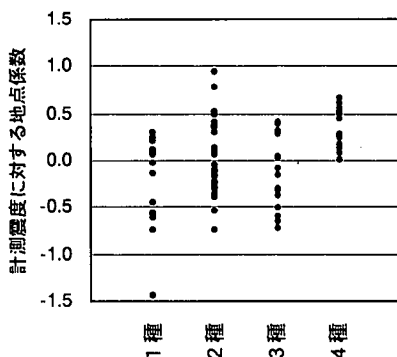
図-7(a)-(c)に地盤種別と各種地点係数の関係を示す。いずれの指標についても同一地盤種別内での地点係数のばらつきは大きい、最大速度や計測震度の地点係数の平均値は、1種から4種の順に大きくなる、すなわち、軟らかい地盤ほど揺れやすい傾向が認められ、とくに最大速度に関してこの傾向が顕著である。このことは既に論文^{6),8)}で指摘されているが、今回、見直した地盤種別についても、同様な結果が得られた。



(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) 計測震度

図-7 地点係数と地盤種別の関係

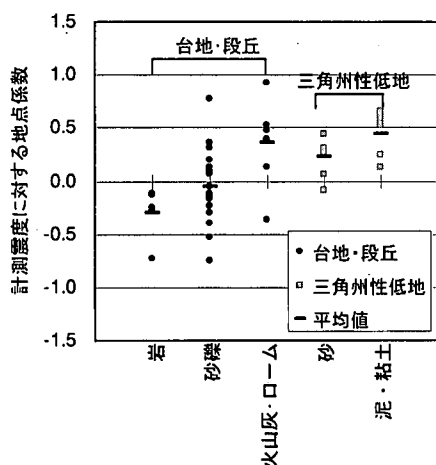


図-8 同一地形分類における表層地質の影響

4. 土地分類と地盤増幅度の関係

以上、各種の土地条件・地盤条件と地震動強度指標の地点係数の関係を検討してきたが、いずれのパラメータも単独ではばらつきが大きいことが分かった。しかし、広域の地震動分布推定への利用という目的を踏まえて、以下では、ボーリングデータや固有周期のように入手が困難な情報を用いずに、国土数値情報を利用して推定が可能な土地分類によって地盤増幅度を推定する方法を考えることにする。

3 (2)で検討を行った土地分類のうち、表-3において表層地質と地形分類との相関係数が比較的大きかったことから、同一の地形分類ごとに表層地質の違いによる地点係数の違いを調べた。その結果の一例を図-8に示す。

台地・段丘の表層地質は、「岩」、「砂礫」、「火山灰・ローム」に分類される。それぞれのグループの地点係数の平均値を求めると、いずれの地震動指標についても、「岩」→「砂礫」→「火山灰・ローム」の順に地点係数が大きくなる。このことから「台地・段丘」は3グループに細分類することにした。

三角州性低の表層地質は、図-8に示すように「砂まじり」と「泥・粘土」の2グループに分類される。それぞれのグループの地点係数について平均値を求めると、最大加速度、最大速度、計測震度いずれの地点係数も「泥・粘土」グループの方が大きいことがわかった。そこで、三角州性低地を「砂まじり」と「泥・粘土」の2グループに細分類することにした。

三角州性低地と台地・段丘以外の地形区分、すなわち山地、丘陵地、扇状地性低地、砂州・砂丘および埋立地については、山地と丘陵は岩、扇状地性低地は砂礫、砂州・砂丘は砂、埋立地は砂、というよ

表-5 地形・表層地質による11分類の平均地点係数

No.	地形・表層地質	最大加速度	最大速度	計測震度	地点数
1.	埋立地	0.009	0.065	0.096	3
2.	砂州・砂丘	0.038	0.065	0.178	3
3.	三角州性低地 (泥・粘土)	0.081	0.203	0.389	8
4.	三角州性低地 (砂まじり)	0.029	0.118	0.216	8
5.	扇状地性低地	-0.166	-0.092	-0.286	11
6.	火山灰台地	0.205	0.137	0.350	7
7.	砂礫台地	-0.005	-0.053	-0.064	18
8.	岩石台地	-0.131	-0.134	-0.309	5
9.	丘陵地	0.054	-0.029	-0.069	5
10.	火山山麓地	0.148	0.018	0.134	3
11.	山地	-0.107	-0.261	-0.554	3
相関係数		0.602	0.705	0.684	74

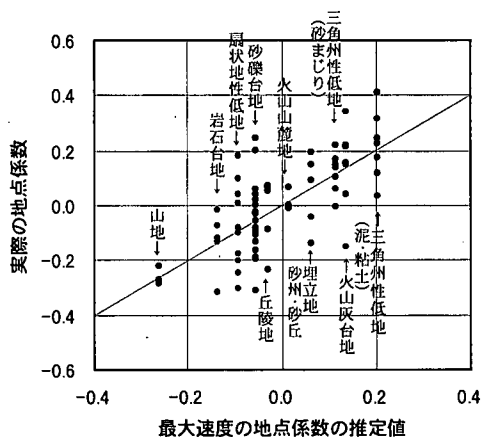


図-9 最大速度の地点係数の推定値と実際値の関係

うにそれぞれ同一の表層地質で構成されるため再分類はできない。

以上の検討を踏まえて、表-5に示すような地形分類で主分類し、これに表層地質による副分類を組み合わせたグループ分けをすることにした。なお、地形分類は、地形の成因、形態(起伏)、構成物質、形成時代が等質となるものを最小の地形単位(微地形)として分類することから、表に示す分類には結果的に地質時代も考慮されていることになる。77観測地点のグループ分けの判定結果は表-1に一覧した。

表-5には各グループ内の地点係数の平均値、平均値の算出に用いた観測点数、およびその平均値と実際の地点係数との相関係数を併せて示す。地点係数の平均値を求めるに際して「松代」「網代」「稚内」の3地点は除外した。これは、地震計の設置場所が松代(山地)では岩盤トンネル内、網代(山地)では山地の崖錐地盤上に置かれているという他と著しく異なる条件のために、地点係数が図-2および図-3で明らかにように特異点となっているためである。また、

表-6 地形・表層地質による11分類の地盤増幅度と国土数値情報による分類基準と11分類の対応

国土数値情報		本研究による11分類	地盤増幅度		
地形分類	表層地質		最大加速度	最大速度	計測震度 [*]
埋立地/埋立地・干拓地	砂/砂がち	1. 埋立地	1.31	2.12	0.65
自然堤防/自然堤防・砂州/砂丘低地/被覆砂丘	砂/砂がち/砂丘砂	2. 砂州・砂丘	1.40	2.12	0.73
干拓地/三角州性低地/氾濫原性低地	泥/泥がち/シルト/粘土/泥炭	3. 三角州性低地(泥・粘土)	1.54	2.92	0.94
	砂/砂がち/砂、泥/砂、泥、礫互層	4. 三角州性低地(砂まじり)	1.37	2.39	0.77
扇状地性低地/火山性扇状地	礫/砂礫/礫がち	5. 扇状地性低地	0.87	1.48	0.27
ローム台地(上位・中位・下位)/ローム台地・段丘(上位・中位・下位)/シラス台地(上位・下位)/火山灰砂台地	火山灰/ローム/シラス/軽石流堆積物	6. 火山灰台地	2.05	2.50	0.90
砂礫台地(上位・中位・下位)/砂礫台地・段丘(上位・中位・下位)	礫/砂礫/礫がち	7. 砂礫台地	1.26	1.62	0.49
岩石台地(上位・中位・下位)/岩石台地(段丘Ⅰ・段丘Ⅱ)/石灰岩台地(上位・中位・下位)	岩石	8. 岩石台地	0.95	1.34	0.24
大起伏丘陵地/小起伏丘陵地/火山性丘陵地	岩石	9. 丘陵地	1.45	1.71	0.48
火山山麓地/溶岩原/溶岩台地	火山碎屑物/溶岩流/泥流堆積物	10. 火山山麓地	1.80	1.91	0.69
大起伏山地/中起伏山地/小起伏山地/山麓地/大起伏火山地/中起伏火山地/小起伏火山地	岩石/火山性岩石	11. 山地	1.00	1.00	0.00

*計測震度の地盤増幅度は、地表面と基盤面における計測震度値の「差」として定義されている。

稚内(埋立地)の観測地点は山地の縁辺に造成された小規模な埋立地上にあり、地表面下浅所に岩盤が存在するなど、地盤特性から見てわが国の一般的な埋立地とは異なると判断した。

グループ内の地点係数の平均値と実際の地点係数との間の相関係数は、最大速度の地点係数の0.705が最大で、最大加速度についてのものが最小になっており、この傾向はこれまで他の分類方法で見てきた通りである。

以上のように、地形・表層地質により11分類した各グループ内の平均値を地点係数の推定値とし、その値と実際の地点係数の関係を図-9に示す。これより、地形と表層地質を組合せても、地点係数の推定に、まだかなりばらつきがあることが分かる。

表-5に示した地点係数の平均値を地盤増幅度に変換した結果を表-6に示す。基盤面としては地形が「山地」に分類される地域の地表面に近いものと考え、「山地」グループの地盤増幅度が1.00(計測震度の地盤増幅度では0.00)となるように換算した。なお、表-6には本研究による地形・表層地質を表すグループの名称と国土数値情報の地形・表層地質データとの対応も併せて示している。表-6を利用することにより、国土数値情報に基づき日本全土の地盤増幅度を1kmメッシュ単位で推定することが可能になる。

5. 既往の研究結果との比較

本研究で得られた地盤増幅度(表-6)と、既往の2つの研究結果^{12),13)}との比較を行う。表-7に各研究に

表-7 各研究で地盤増幅度の推定が可能な地震動指標値・

	最大加速度	最大速度	計測震度
松岡・翠川の研究(1993)	△	○	-
西阪・福和の研究(1997)	○	○	-
本研究	○	○	○

より地盤増幅度の推定が可能な地震動指標値を示す。表中、松岡・翠川の研究において最大加速度の増幅度の推定が△となっているのは、加速度増幅度は地表から10mまでの地盤の平均S波速度、 $AVS(10)$ により算定するが、国土数値情報のみからこれを求める方法は示されていないためである。以下では最大速度について3者の研究による推定結果の比較を行うことにする。

松岡・翠川の研究、西阪・福和らの研究ではいずれも標高の影響を考慮している。本研究との比較を行うためには、それぞれの研究で用いる地形・表層地質分類ごとに標高値を設定する必要がある。そこ、ここでは気象庁77観測点の標高を読みとり、地形・表層地質分類ごとに平均値を求め、その平均で値を各分類における代表的な標高値とみなし、両者による推定式の標高の項に代入した。また、3者を比較する場合には「基盤面」の定義を統一する必要がある。松岡・翠川の研究では、「新第三紀ないしそれ以前の丘陵地」に対する増幅度の推定式が提案されている^{10),11)}ので、この式を用いて各地形区分ごとの増幅度を求め、これを山地相当とみなしてそのまま用いた。西阪・福和の研究では地表面と地震基盤の振幅比を増幅度としている¹³⁾ため、「山地」に分類される地域の地表面の増幅度が1.00となるように、す

表-8 最大速度の地盤増幅度に関する既往の研究結果との比較

本研究		松岡・翠川(1993)の研究			西阪・福和ら(1997)の研究		
地形・表層地質	増幅度	地形	表層地質	増幅度	地形	表層地質	換算増幅度
三角州性低地(泥)	2.92	人工改変地		1.55	干拓地	未固結(砂)	2.18
砂州・砂丘	2.12	砂州・自然堤防	泥堆積	1.98	自然堤防・砂州	未固結(泥)	2.96
三角州性低地(砂)	2.39	砂州・自然堤防	泥堆積以外	1.65	自然堤防・砂州	未固結(砂)	2.22
埋立地	2.12	三角州性低地	東京低地	2.58	三角州性低地	未固結(砂)	2.02
火山灰台地	2.50	埋立地		2.19	埋立地・盛土	未固結(砂)	1.45
砂礫台地	1.62	ローム台地		1.61	砂礫台地	未固結(砂)	1.32
扇状地性低地	1.48	砂礫台地		1.32	砂礫台地	未固結(互層)	1.04
丘陵地	1.71	扇状地性低地		1.34	扇状地性低地	未固結(礫)	0.87
山地	1.00	小起伏丘陵地		1.50	小起伏丘陵地	固結	1.59
		新第三紀		1.23	山地	固結	1.00
		中・古生代層		0.71			
火山性山麓地・台地	1.91						

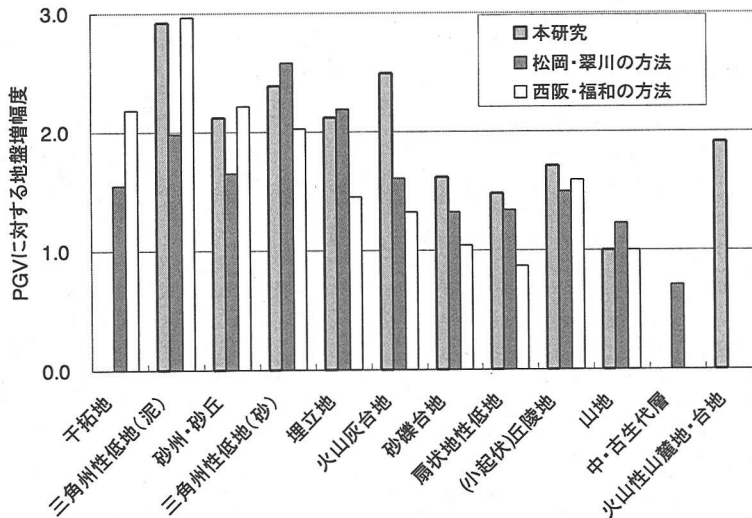


図-10 最大速度の地盤増幅度に関する既往の研究結果との比較

すべての増幅度を山地の増幅度1.45で除し、「換算増幅度」として表-8に示した。

以上のようにして求めた最大速度の地盤増幅度を表-8および図-10に比較して示す。それぞれの推定方法における地形・地質分類ごとの増幅度の増減は、3者ともほぼ同じ傾向を示しており、換算増幅度の絶対値についても、地形地質区分によっては差が見られるものもあるが概ね近似した結果となっている。また、前述したように、地形や表層地質のみからの地盤増幅度の推定には、かなりのばらつきが含まれることは避けられない。したがって、その利用については、広域における地震動分布の概略推定に限定すべきであろう。

6. 結論

本研究は、わが国の地盤の増幅特性を一般に入手可能なデータから推定する方法について検討したものである。日本全国に配置された気象庁87型強震計の77観測点で得られた過去8年余りの強震記録に基づき構築された最大加速度、最大速度、計測震度の距離減衰式における「地点係数」と、各観測地点ごとに土地分類基本調査等によって調べた土地分類との関係を整理した。その結果、77観測点を地形分類と表層地質によって11グループに分類した場合、各グループ内の地点係数のばらつきが最も小さくなることが分かった。各グループの地点係数の平均値を換算することにより、それぞれの指標について、地形分類の「山地」を規準とする地盤増幅度を求めた。

これにより、国土数値情報の地形・表層地質データから、最大加速度、最大速度、計測震度についての日本全土の地盤増幅度を1kmメッシュ単位で推定することが可能になった。また、この結果を既往の2つの研究結果と比較した結果、増幅度の推定法やもとなるデータが全く異なるにも関わらず、最大速度の増幅率は3者で比較的近似した結果が得られた。

今後は、より多くの観測点（例えばK-NETの1,000地点）から得られた強震記録と土地分類について今回と同様の分析・検討を行い、さらに細かいグループ分けを行うことで、地盤増幅度の推定精度を上げることが可能になると考えられる。

参考文献

- 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，1997。
- 消防科学総合センター：地震被害予測システムに関する検討調査報告書，1997。
- 土岐憲三：大都市における地震災害のリアルタイム制御・リアルタイム地震防災をめざして，自然災害と地域社会の防災，第9回「大学と科学」公開シンポジウム組織委員会編，クバプロ，pp. 90-100, 1995。
- Noda, S. and Meguro, K.: A New Horizon for Sophisticated Real-time Earthquake Engineering, Journal of Natural Disaster Science, 17 (2), pp. 13-46, 1995。
- 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577/I-41, pp. 1-16, 1997。
- Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep Focus Events, Bulletin of the Seismological Society of America, 85 (5), pp. 1343-1358, 1995。
- Molas, G.L. and Yamazaki, F.: The Effect of Source Depth and Local Site to the Attenuation Characteristics of Response Spectra, 第23回地震工学研究発表会講演概要，pp. 69-72, 1995。
- Shabestari, K.T. and Yamazaki, F.: Attenuation of JMA Intensity Based on JMA-87-Type Accelerometer Records, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp. 153-156, 1997。
- 国土庁計画調整局，国土地理院：国土数値情報（改訂版），国土情報シリーズ8，大蔵省印刷局，1992。
- 翠川三郎，松岡昌志，作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価，日本建築学会構造系論文報告集，第442号，pp. 71-78, 1992。
- 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定，日本建築学会構造系論文報告集，第443号，pp. 65-71, 1993。
- 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，pp. 51-56, 1993。
- 西阪理永，福和伸夫，荒川政知，銭傑：国土数値情報を活用した地盤増幅度と地震動の予測，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp. 341-344, 1997。
- 福和伸夫，荒川政知，西阪理永：国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定，構造工学論文集，Vol. 44B, pp. 77-84, 1998。
- 愛知県：愛知県東海地震被害予測調査報告書，1993。
- 名古屋市：名古屋市地震被害想定調査報告書，1997。
- 国土庁防災局防災対策課：地震防災情報システム(DIS)の整備について，人と国土，Vol. 22, No. 3, pp. 47-49, 1996。
- 自治省消防庁消防研究所：簡易型地震被害想定システムユーザーズガイド，1996。
- 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164, 1997。
- Joyner, W. B. and Boore, D. M.: Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 71, pp. 2011-2038, 1981。
- Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, 80 (4), pp. 757-783, 1990。
- 経済企画庁：土地分類基本調査(縮尺1/5万)，「秋田」1966，「仙台」1967，「水戸」1969，「宇都宮」1960，「前橋」1956，「金沢」1969，「長野」1974，「飯田」1967，「福井」1971，「米子」1967，「宮崎」1970，「熊本」1970。
- 経済企画庁：土地分類基本調査(縮尺1/20万)，「北海道Ⅰ～Ⅷ」，1972～1977。
- 青森県：土地分類基本調査(縮尺1/5万)，「青森東部」，1983，「八戸東部・階上岳」1995。
- 岩手県：同上，「盛」，1973，「盛岡」，1978。
- 宮城県：同上，「石巻・奇巖・金華山」，1981。
- 山形県：同上，「酒田」，1978。
- 福島県：同上，「若松」，「川部・小名浜」，1995。
- 千葉県：同上，「館山」，1970，「上総大原」，1973，「銚子」，1984。
- 東京都：同上，「大島」，1989，「八丈島・青ヶ島」，1992。
- 神奈川県：同上，「横浜」，1988。
- 新潟県：同上，「新潟」1972，「高田東部」1979。
- 富山県：同上，「富山」，1983。
- 石川県：同上，「輪島」。
- 山梨県：同上，「山中湖・秦野」，1982，「甲府」，1984。
- 長野県：同上，「松本」，1988。
- 静岡県：同上，「浜松」，1971，「掛川・御前崎」，1972，「静岡・住吉」，1973，「沼津」1977，「下田・神子元島」，1982，「熱海・小田原」，1985，愛知県：同上，「桑名・名古屋南部」，1985。
- 三重県：同上，「津東部」，1990。
- 滋賀県：同上，「彦根西部」，1981。
- 京都府：同上，「舞鶴」，1980。
- 大阪府：同上，「大阪東北部」，1980。
- 兵庫県：同上，「神戸」，1995。
- 和歌山県：同上，「那智勝浦・串本」，1981。
- 鳥取県：同上，「鳥取南部」，1975。
- 島根県：同上，「松江」，1974，「江津・浜田」，1976。
- 岡山県：同上，「岡山南部」，1979。
- 広島県：同上，「広島」，1978。
- 山口県：同上，「小倉」，1980。
- 愛媛県：同上，「松山北部」，1975，「宇和島」，1980。
- 高知県：同上，「柏島・土佐清水」，1980，「奈半利・室戸岬」1982。
- 福岡県：同上，「小倉」1971，「福岡・津屋崎・神湊」1984。

- 52) 大分県：同上,「大分・佐賀関」,1978.
 53) 熊本県：同上,宮崎県：同上,「延岡・島浦」,1988.
 54) 鹿児島県：同上,「鹿児島」,1973,「種子島」,1980,「名瀬」,1981.
 55) 沖縄県：同上,「那覇」,1983,「宮古島」,1984,「石垣島」1985.
 56) 大矢雅彦編：地形分類の手法と展開, 古今書院, 1987.
 57) 門村 浩：扇状地の微地形とその形成, 扇状地, 古今書院, pp.51-96, 1971.
 58) 日本道路協会：道路橋示方書・同示法書Ⅴ耐震設計編(昭和55年度版), 1980.

(1998.7.29 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN GEOMORPHOLOGICAL LAND CLASSIFICATION AND AMPLIFICATION RATIO BASED ON JMA STRONG MOTION RECORDS

Jun-ichi ONISHI, Fumio YAMAZAKI and Kazue WAKAMATSU

The relationship between the soil amplification ratio and the ground condition was examined using strong motion records measured at 77 JMA stations in the period of over 8 years. The amplification ratio for the instrumental JMA intensity as well as the peak ground acceleration and velocity was obtained from the station coefficients of the attenuation relationships. The combined use of the geomorphological land classification and the surface geology was found to give the best estimate of the amplification ratio. This result suggests that the Digital National Land Information may be conveniently used for the estimation of strong motion distribution of a large area in Japan.