

滋賀県草津市の表層地盤構造と地盤振動特性について

鍋島 康之* 早川 清** 長谷川 央***

Surface Ground Conditions and Ground Vibration Characteristics in Kusatsu, Shiga

Yasuyuki NABESHIMA, Kiyoshi HAYAKAWA, Nakaba HASEGAWA

ABSTRACT

Ground vibration characteristics generally have a relationship with surface ground conditions. Ground vibration characteristics were analyzed from the distribution of predominant periods by measuring micro-tremors in Kusatsu city, Shiga prefecture. The seismic micro-zoning map in Kusatsu city was made by using a geographic information system. The distribution of predominant periods was visually compared with surface ground conditions such as topographic and geological characteristics. The round ranges of predominant periods in all ground conditions could be grasped, in which the predominant period increased as the thickness of the surface layer increased.

KEY WORDS: micro-tremor, micro-zoning map, geographic information system, surface layer

1. はじめに

中央防災会議では近い将来、発生することが予想される南海・東南海地震に対する防災対策を検討するため、図 1 に示すような表層地盤のゆれやすさ全国マップ¹⁾を作成している。地震によるゆれの強さは地震の規模(マグニチュード)、震源からの距離、表層地盤の 3つの要素によって異なり、地震の規模や震源からの距離が同じであっても、表層地盤の違いによりゆれの強さが異なることを示している。しかし、このマップでは各都道府県を 1km×1km のメッシュに分割して震度分布を推定しており、実際のゆれはさらに詳細なメッシュ分割を行い、地盤条件等を考慮して推定する必要がある。

そこで、本研究では滋賀県草津市を対象地域として 500m×500m のメッシュに分割し、153 箇所において常時微動を計測した。常時微動は地盤の振動特性を簡便に推定する手法²⁻⁵⁾として、近年広く用いられている。そして常時微動測定結果からスペクトル比を求め、地盤の卓越周期を推定し、地理情報システム(GIS)を用

いて地盤振動特性のゾーニングを行った。また、GIS の機能を用いて、草津市の地形、土地条件、表層地盤の層厚などと比較を行い、表層地盤構造と地盤振動特性の相関性について検討を行った。

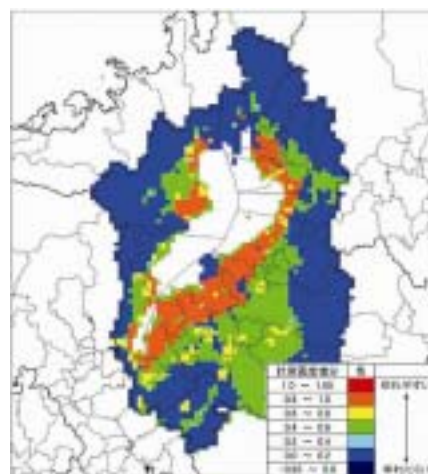


図 1 ゆれやすさ全国マップ(滋賀県)¹⁾

2. メッシュ分割ならびに常時微動測定方法

地震に対する地盤の振動特性をゆれやすさ全国マッ

*都市システム工学科, **立命館大学, ***立命館大学大学院

よりも詳細に検討するため、本研究では滋賀県草津市を図2に示すように500m×500mのメッシュに分割し、草津市を229の区域に分け、メッシュ内において最低1地点において常時微動測定を行うことにした。

常時微動とは地震の有無に関わらず、常に地盤に生じている微小振動のことを言い、振幅としては数十マイクロメートル程度の振動である。交通機関や建設工事や工場の機械等の人為的要素、風や波浪などの自然的要素を振動源としている。常時微動は地盤によってゆれや周期が異なり、その特性を利用して地震時の地盤のゆれやすさを推定することができる。一般的に硬い地盤では常時微動の周期は短く、高周波数の成分が多い。逆に軟弱な地盤では常時微動でもゆれが大きく、周期が長くなる傾向を示す。



図2 草津市メッシュ分割図

地震に対する地盤の動的な特性を調べる方法として、ボーリング孔を用いたPS検層や標準貫入試験によるN値からS波を推定する方法などがある。近年、常時微動が地盤の動的特性を含んでおり、地盤振動特性に密接な関係が含まれていることが広く認識されてきているため、本研究では測定が容易な常時微動測定から地盤の固有周期を推定することにした。

地盤の固有周期を既存のボーリング柱状図を用いた固有周期の推定式や地震応答解析による地盤の固有周期推定法から求め、常時微動から求めた値と比較した結果⁵⁾、これらの値と常時微動測定から得られた卓越周期はよく一致することが判明し、常時微動測定から得られた卓越周期を地盤の固有周期として扱えることが検証されている。

常時微動測定では、図3に示すような簡易振動計SPC-35Nならびにサーボ型速度計を用いて、東西方向(EW)、南北方向(NS)および鉛直方向(UD)の3

成分について測定した。なお、外部電源には自動車用バッテリーを使用した。常時微動の測定箇所の選定にあたっては地盤表面に人工的な被覆等がされていない公園、神社、グラウンドなどの自然地盤で、周辺に明らかな外部擾乱(振動源)が無い場所を選定した。また常時微動測定に際しては交通振動などの影響が少ない夜間を中心として計測を行うようにした。そして、常時微動測定時にはモバイルGPSレシーバー(Mio 168)を携帯し、世界測地系に基づいて緯度・経度の計測を行うとともに、測定地点周辺の状況を記録した。



図3 簡易振動計(上)およびサーボ型速度計(下)

3. 地盤の固有周期

3.1 常時微動測定結果

図4に常時微動を測定した153箇所を示す。今回の計測では図2に示したすべてのメッシュについて常時微動測定を実施することができなかったが、測定地点は草津市内をほぼ網羅しており、後で述べるが草津市の代表的な地形や土地条件の地域を包括しているため、概略ではあるが地盤振動特性を把握することができる判断した。

3.2 地盤の卓越周期推定法

各測定箇所における地盤の卓越周期を推定するために、ここではスペクトル比を用いることにした。まず、各測定点で得られた常時微動測定結果の3成分記録から、明らかに外部擾乱の影響を受けている部分を避け、300000ポイントの中から8192ポイント(約164秒)を選び、東西方向、南北方向、鉛直方向の3成分につい

て高速フーリエ変換 (FFT) 解析によるスペクトル分析を行う。そして、3 成分のフーリエスペクトルから、式 (1) を用いて H/V スペクトル比を計算し、卓越周期を推定した。常時微動計測結果から地盤の卓越周期を推定する手法の詳細は参考文献^{5),6)}を参照されたい。

$$H/V = \sqrt{(EW^2 + NS^2) / (2UD^2)} \quad (1)$$

ここに、H/V : H/V スペクトル比, EW : 東西方向成分, NS : 南北方向成分, UD : 上下方向成分である。

図 5 に上記の H/V スペクトル比により卓越周期を求めた例を示す。明らかに振幅が卓越する周期が見られ、卓越周期を容易に判断することができる。上記の方法により得られた各測定点の卓越周期を表 1 に示す。



図 4 常時微動測定箇所

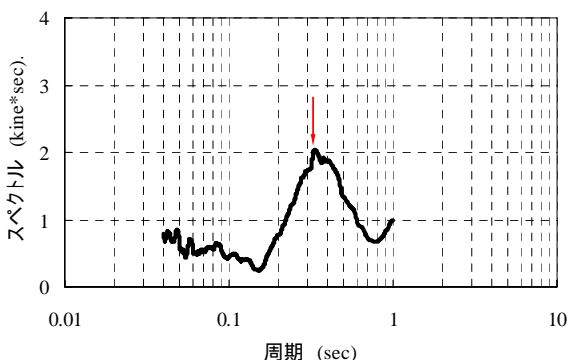


図 5 H/V スペクトル比による卓越周期の決定法

4. 地盤震動 GIS の構築

本研究では市販の GIS アプリケーションソフト (SIS Map Modeller Ver6.0) を用いて GIS の構築⁷⁾を行った。基礎データとしては、数値地図情報 2500 (空間データ基盤), 数値地図 25000 (地図画像), 数値地図 50m メッシュ (標高), 土地条件図を組み込んだ。ただし、土

地条件図だけは数値化されたものが出版されたものが出版されていなかったため、スキャナーで読み込んだ画像を幾何学補正したものを使用した。

次に草津市内 153 箇所 で測定された常時微動測定結果から推定された卓越周期データを組み込み、地形・土地条件などをオーバーレイすることにより、地盤の卓越周期と地盤条件との相関性について分析した。また、本研究では草津市周辺で実施されたボーリングデータ、標高データならびに土地条件図に示されている基盤高をもとに地盤表層の軟弱地盤の層厚分布を求め、地盤の卓越周期との相関性について検討を行った。

5. 表層地盤構造と地盤震動特性

5.1 卓越周期分布と草津の地形

草津市の地形的な特徴として、琵琶湖南東岸に広がる低平な沖積低地によって大部分が占められており、市域の南東端に位置する丘陵と山地が標高区分に多少変化を与えているだけで、標高 250m を超える高地 (最高地点 235m) はみられないことがあげられる。また、南東部には標高 150m 前後の丘陵地が分布し、丘陵地の先端には沖積低地との境界として比高 1~2m の段丘崖がみられる。

図 6 に常時微動計測から得られた卓越周期をもとに作成した草津市内の卓越周期分布を示す。一般的に地盤が軟らかくなるにつれて卓越周期は長くなる傾向を示すが、図から明らかのように卓越周期が長い地域と短い地域が存在することがわかる。特に湖岸周辺では南東から北西に向かって、卓越周期が大きくなる傾向があることがわかる。また草津市の南部では西から東に向かい卓越周期が長くなることも確認できる。

図 7 は卓越周期と標高データの関係である。明らかに標高が低い部分において卓越周期が長くなる傾向を示し、山間部では卓越周期が短くなる傾向を示す。しかし、標高の高い地点でも卓越周期が長い箇所や、標高の低い所でも部分的に卓越周期が長い箇所が所々にあることが確認できる。この様に標高データからは概略的な傾向については検討できるが、詳細な検討を行うため、次に地形の影響について検討する。

図 8 は土地条件図に示されている地形区分と卓越周期分布の関係である。また、土地条件図に示されている地形区分毎の常時微動測定データ数および卓越周期の最小周期と最大周期を表 2 に示す。表 2 からわかるように各地形分類に最低 1 箇所の測定データが得られているので、草津市の代表的な地形区分と卓越周期の関係について検討する。図 8 および表 2 から明らかに地形区分毎に卓越周期の分布幅に特徴が存在すること

表1 常時微動計測点の緯度経度および卓越周期

No	東経(°)	北緯(°)	卓越周期(sec)	No	東経(°)	北緯(°)	卓越周期(sec)	No	東経(°)	北緯(°)	卓越周期(sec)
1	135.965	34.982	0.18	52	135.929	35.036	0.19	103	135.925	35.000	0.25
2	135.964	34.978	0.13	53	135.953	35.036	0.46	104	135.914	34.997	0.31
3	135.963	34.978	0.19	54	135.932	35.075	0.28	105	135.913	34.994	0.30
4	135.960	34.982	0.19	55	135.940	35.069	0.35	106	135.946	35.037	0.30
5	135.965	34.984	0.21	56	135.917	35.028	0.30	107	135.949	35.038	0.50
6	135.970	34.986	0.12	57	135.920	35.028	0.30	108	135.950	35.038	0.50
7	135.983	34.987	0.13	58	135.936	35.031	0.29	109	135.949	35.035	0.32
8	135.983	34.989	0.12	59	135.946	35.027	0.29	110	135.959	35.050	0.55
9	135.980	34.994	0.21	60	135.921	35.018	0.13	111	135.953	35.053	0.35
10	135.980	34.994	0.10	61	135.917	35.009	0.12	112	135.947	35.048	0.26
11	135.979	35.002	0.16	62	135.947	34.971	0.18	113	135.950	35.049	0.34
12	135.967	34.994	0.16	63	135.955	34.977	0.17	114	135.933	35.028	0.30
13	135.949	34.984	0.13	64	135.956	34.975	0.10	115	135.931	35.030	0.31
14	135.949	34.981	0.18	65	135.956	34.974	0.30	116	135.929	35.032	0.55
15	135.944	34.984	0.12	66	135.961	34.967	0.28	117	135.918	35.037	0.40
16	135.945	34.986	0.12	67	135.968	34.968	0.20	118	135.919	35.036	0.30
17	135.944	34.993	0.18	68	135.957	34.998	0.30	119	135.915	35.039	0.34
18	135.950	34.998	0.19	69	135.989	34.973	0.30	120	135.916	35.030	0.28
19	135.960	34.992	0.13	70	135.988	34.978	0.15	121	135.927	35.047	0.34
20	135.962	35.003	0.11	71	135.978	34.978	0.19	122	135.953	35.048	0.30
21	135.954	35.005	0.25	72	135.977	34.988	0.12	123	135.943	35.037	0.28
22	135.961	35.008	0.12	73	135.957	34.998	0.26	124	135.942	35.036	0.30
23	135.975	35.010	0.15	74	135.958	34.993	0.26	125	135.989	34.991	0.27
24	135.937	34.994	0.13	75	135.963	34.990	0.18	126	135.990	34.987	0.24
25	135.927	34.997	0.16	76	135.960	34.988	0.17	127	135.990	34.986	0.20
26	135.915	35.001	0.47	77	135.959	34.982	0.17	128	135.954	34.998	0.28
27	135.914	35.007	0.29	78	135.961	34.985	0.28	129	135.932	35.043	0.10
28	135.925	35.013	0.34	79	135.937	35.023	0.35	130	135.933	35.044	0.23
29	135.926	35.018	0.41	80	135.933	35.024	0.30	131	135.939	35.053	0.30
30	135.931	35.025	0.47	81	135.932	35.021	0.31	132	135.946	35.061	0.13
31	135.947	35.035	0.18	82	135.924	35.015	0.35	133	135.945	35.059	0.38
32	135.959	35.027	0.43	83	135.992	34.997	0.30	134	135.944	35.060	0.40
33	135.954	35.025	0.21	84	135.992	35.000	0.28	135	135.952	35.027	0.23
34	135.942	35.026	0.28	85	135.995	34.998	0.30	136	135.977	35.003	0.30
35	135.931	35.015	0.13	86	136.002	34.993	0.10	137	135.978	35.000	0.28
36	135.944	35.007	0.11	87	136.003	34.988	0.32	138	135.971	34.999	0.42
37	135.957	35.013	0.16	88	135.995	34.994	0.31	139	135.968	35.002	0.28
38	135.947	35.012	0.10	89	135.986	35.005	0.40	140	135.972	35.005	0.29
39	135.933	35.020	0.27	90	135.982	35.005	0.30	141	135.967	35.018	0.30
40	135.917	35.047	0.90	91	135.985	34.996	0.27	142	135.965	35.019	0.40
41	135.926	35.056	0.33	92	135.946	35.003	0.26	143	135.970	35.018	0.40
42	135.935	35.069	0.13	93	135.942	35.004	0.27	144	135.955	35.024	0.38
43	135.938	35.074	0.28	94	135.941	35.006	0.26	145	135.943	35.004	0.42
44	135.939	35.060	0.64	95	135.935	35.007	0.26	146	135.951	35.015	0.28
45	135.945	35.056	0.74	96	135.939	35.014	0.27	147	135.914	35.009	0.39
46	135.954	35.059	0.44	97	135.938	35.016	0.31	148	135.914	35.010	0.27
47	135.959	35.052	0.12	98	135.919	35.004	0.15	149	135.934	35.056	0.28
48	135.953	35.044	0.19	99	135.925	35.007	0.30	150	135.960	35.034	0.41
49	135.944	35.045	0.51	100	135.926	35.006	0.25	151	135.929	35.052	0.32
50	135.932	35.052	0.76	101	135.928	35.003	0.40	152	135.931	35.055	0.30
51	135.926	35.041	0.70	102	135.926	35.001	0.27	153	135.936	35.053	0.30

がわかる。特に、斜面、台地・丘陵地、扇状地および天井川沿いの微高地では卓越周期の最小・最大値ともに他の地形区分と比べて短いという地盤特性があらわれている。一方、谷底平野・氾濫平野、湖岸平野・三角州および自然堤防では最大卓越周期は長くなる傾向がみられるが、最小周期の値は斜面、台地・丘陵地などとあまり変わらないため、卓越周期の分布幅が広いことがわかる。

以上のように土地条件図に示された地形区分と卓越周期分布について検討したが、地盤条件ごとに傾向がある程度みられるが、卓越周期のばらつきが大きく各地層について卓越周期の代表値を特定することができなかった。

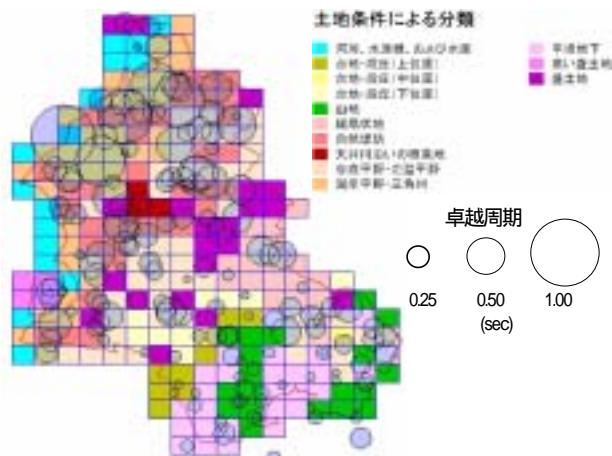


図 8 卓越周期分布と微地形区分

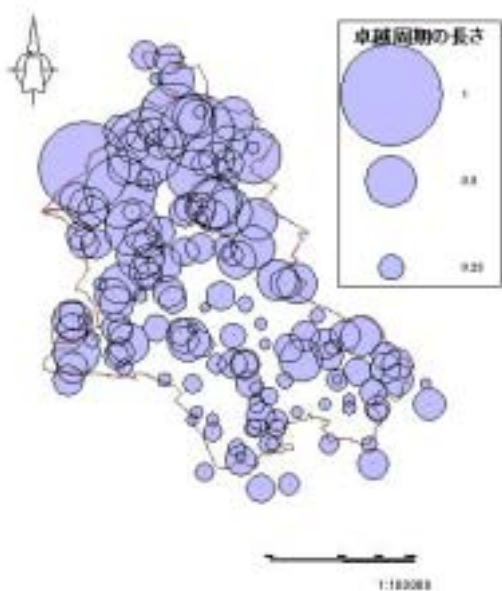


図 6 常時微動計測から得られた卓越周期分布

表 2 地形分類と常時微動データ数および最小・最大周期

大地形	微地形	データ数	最小周期 (sec)	最大周期 (sec)
斜面	緩斜・尾根型	1	0.19	0.19
	緩斜・谷型	3	0.17	0.28
	緩斜・直線型	12	0.13	0.42
	急斜・直線型	1	0.15	0.15
台地・丘陵地	高位面	1	0.12	0.12
	上位面	1	0.28	0.28
	中位面	1	0.42	0.42
低地の微高地	下位面	3	0.12	0.27
	扇状地	8	0.15	0.40
	自然堤防	16	0.16	0.74
低地の一般面	天井川沿いの微高地	3	0.29	0.40
	谷底平野・氾濫平野	34	0.10	0.64
	湖岸平野・三角州	14	0.10	0.76
頻水地形	天井川の部分	2	0.12	0.13
	湿地・水草地	1	0.34	0.34
	潮汐平野	1	0.30	0.30
人工地形	平坦化地	14	0.10	0.38
	高い盛土地	4	0.12	0.39
	盛土地	26	0.10	0.90
	埋土地	3	0.12	0.19

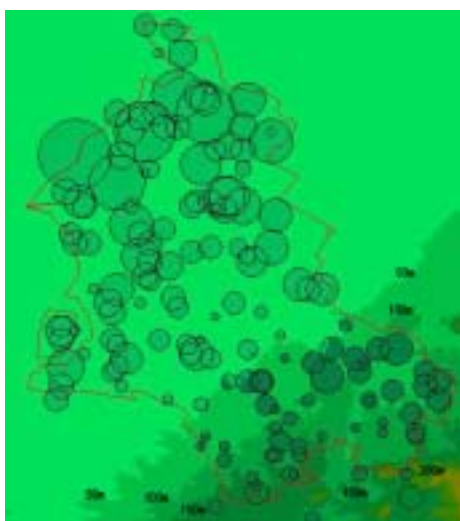


図 7 卓越周期分布と標高データ

5・2 卓越周期分布と表層地盤層厚

前節では卓越周期分布と地形条件について検討を行ったが、大地形・微地形と卓越周期はある程度の相関性は確認できるものの、卓越周期はかなりのばらつきを有していることがわかった。そこで、地盤の振動特性に影響する要因として表層地盤の層厚について検討することにした。草津市周辺で実施された 142 本のボーリングデータ^{8),9)}、標高データならびに土地条件図に示されている基盤高をもとに草津市の表層地盤層厚分布を求め、表層地盤の層厚と卓越周期との相関性について検討を行った。本研究では後述する理由により、基盤高と標高データ、草津市周辺で実施されたボーリングデータの 2 種類のデータを組み合わせ、草津市内

の表層地盤層厚を推定している。

まず、第一段階として土地条件図に示されている基盤高と数値地図 50mメッシュ（標高）より、地盤の層厚を求めることにした。土地条件図（草津市）に表記されている基盤高のレイヤーを SIS 上で標高から計算した等高線のレイヤーとして重ねあわせて表示し、2種類のレイヤーデータの差をとることで層厚データを求めた。しかしながら、土地条件図（草津市）の基盤高は90m以上の等高線が明示されておらず、草津市の南東部分に基盤高が不明な部分がある。そこで、不明な地域を補完するために、ボーリングデータベース^{8),9)}より、抽出した142本のボーリングデータからN値が50以上を示す地層までの深さを各ボーリング箇所属性データとして与え、基盤高の等高線を作成した。ボーリング本数が少ないため、この方法では草津市の北西部に不明な地域がある。そこで本研究では、草津市北西部は土地条件図の基盤高を、南東部はボーリングデータより得られた基盤深さの等高線を用いて表層地盤層厚を決定した。

この様にして得られた草津市の表層地盤層厚分布図を図9に示す。全体として、北東地域に表層地盤層厚の厚い地域が広くみられる。また南東部には部分的に層厚の厚い地域が存在することもわかり、先に示した草津市の地形的傾向を裏付けるとともに、より詳細な表層地盤構造を明らかにすることができた。

図10は表層地盤層厚分布図に卓越周期データをオーバーレイした図である。表層地盤層厚の薄い箇所では卓越周期が短く、厚い箇所では長くなる傾向を示している。さらに詳細に検討するため、常時微動が10点以上計測されている微地形について表層地盤層厚と卓越周期の関係について検討した。

図11は表2に示した微地形区分の内、緩斜・直線型、自然堤防、谷底平野・氾濫平野、湖岸平野・三角州、平坦化地および盛土地における卓越周期と表層地盤層厚の関係を示している。いずれの微地形区分においても卓越周期の最小値は表層地盤層厚の増加にあまり影響されず0.1~0.2secの範囲にあることがわかる。しかし、卓越周期の最大値は、自然堤防、谷底平野・氾濫平野および湖岸平野・三角州の地形では明らかに表層地盤層厚の増加とともに増加することがわかる。また、緩斜・直線型や平坦化地では若干ではあるが、卓越周期の最大値は表層地盤層厚の増加とともに大きくなる傾向がみられるが、盛土地では逆に減少する傾向がみられ、地形毎に卓越周期と表層地盤層厚の関係に差がみられる。

以上のように、地盤振動特性を取り入れたGISを構

築することにより、草津市内の卓越周期分布を視覚的にとらえることができ、地形や地盤条件など容易に比較することができた。GISはこの様な分析や検討を行うには非常に有用なツールであり、今後、GISに様々な地盤情報データを追加することにより、さらに詳細な分析が可能になると考えられる。

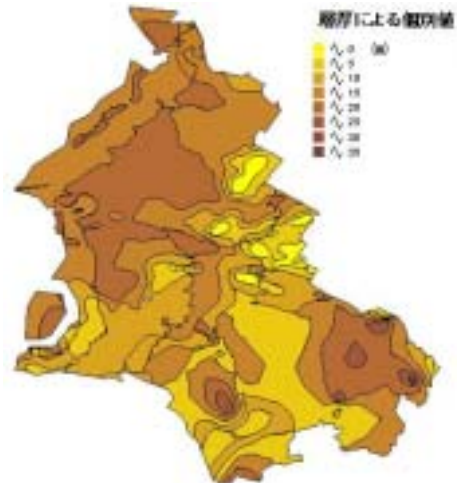


図9 表層地盤層厚分布図

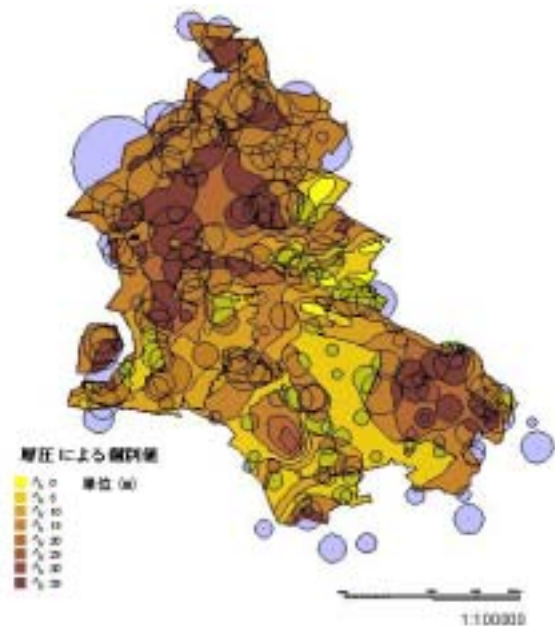
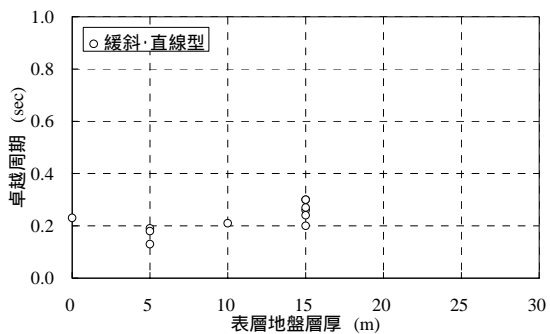
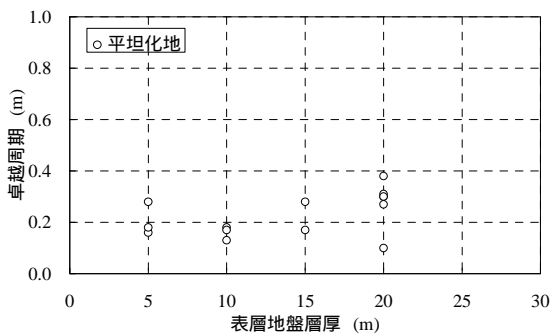


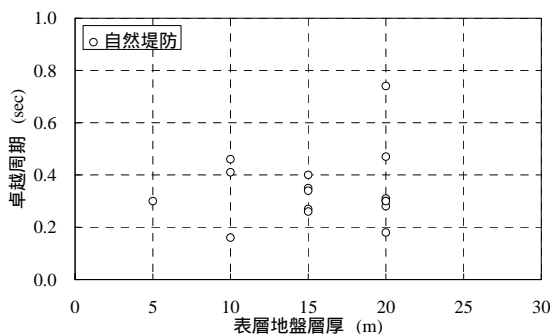
図10 卓越周期分布と表層地盤層厚分布



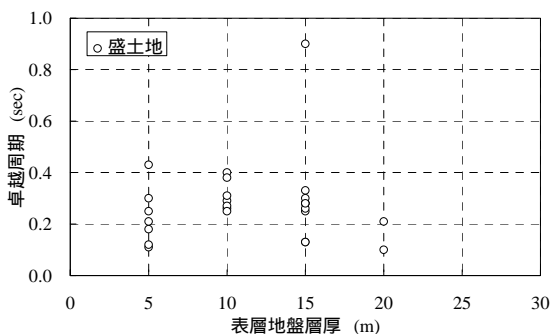
(a) 緩斜・直線型



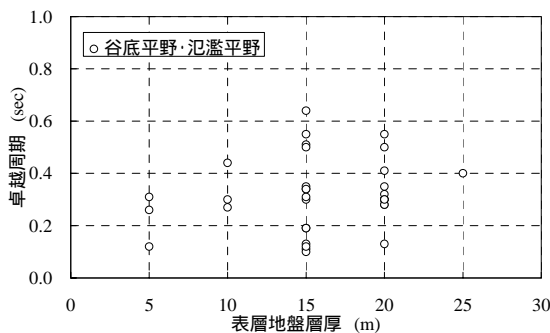
(e) 平坦化地



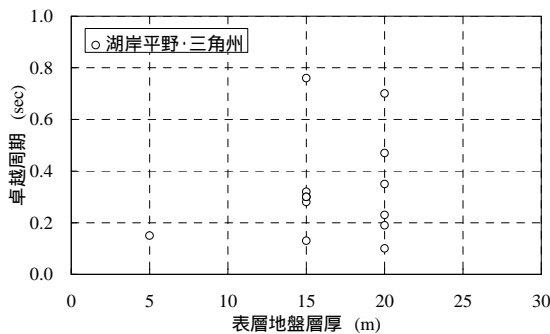
(b) 自然堤防



(f) 盛土地



(c) 谷底平野・氾濫平野



(d) 湖岸平野・三角州

図 1 1 各地形区分の卓越周期と層厚の関係

6. まとめ

本研究では、滋賀県草津市を対象として常時微動測定を行い、地盤の卓越周期を求め、地盤振動特性のマイクロゾーニングを地理情報システムの機能を用いて行った。また、卓越周期分布と各種地盤条件の比較を行い、その相関性について検討を行った。以下に本研究の主な結論を示す。

- (1) 常時微動測定結果から求めた卓越周期分布は、草津市の地形（標高）とある程度の相関性が見られた。
- (2) 卓越周期分布と地形条件について検討を行った結果、大地形・微地形と卓越周期にはある程度の相関性は確認できるものの、卓越周期はかなりのばらつきを示した。
- (3) 土地条件図の基盤高ならびにボーリングデータを用いて草津市の詳細な表層地盤構造を明らかにすることができた。草津市北東地域には表層地盤層厚が厚い地域が広くみられ、また南東部にも部分的に層厚の厚い地域が存在することもわかった。
- (4) 表層地盤層厚と卓越周期について検討した結果、全体的に層厚の薄い箇所では卓越周期が短く、厚い箇所では長くなる傾向を示した。
- (5) 地形区分ごとに表層地盤層厚と卓越周期について

詳細に検討した結果，いくつかの地形区分において表層地盤の層厚が厚くなるほど，卓越周期の最大値が増加する傾向が見られた。

謝辞

本研究は，科学研究費補助金 基盤研究 C(2)(課題番号 17560435)を受けて行った研究の一部である。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府：“地盤のゆれやすさマップ全国マップ 滋賀県”，<http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/yureyasusa/shiga.pdf> (2005).
- 2) 物理探査学会：“物理探査ハンドブック手法編”，pp.195-199 (1999).
- 3) M. Bour, D. Fouissac, P. Dominique and C. Martin: “On the use of microtremor recordings in seismic microzonation”, Soil Dynamic and Earthquake

Engineering, pp.465-474 (1998).

- 4) P. Teves-Costa, L. Matias and P. Bard: “Seismic behavior estimation of thin alluvium layers using micro-tremor recordings, Soil Dynamic and Earthquake Engineering,”, pp.201-209 (1998).
- 5) 早川清，繁松省吾：“常時微動から見た滋賀県地盤の振動特性”，立命館大学理工学研究紀要，62，pp.193-201 (2003).
- 6) Y. Nabeshima and K. Hayakawa: “Micro-tremor measurements in southwestern Shiga prefecture”, Proc. ISOPE-2005, pp.647-651 (2005).
- 7) 鍋島康之，早川清，石田麻衣：“GIS を用いた草津市内の卓越周期分布の検討”，平成 17 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，-20 (2005).
- 8) 関西地質調査業協会：“奈良盆地地盤図・滋賀県地盤図”，pp.49-50 (2003).
- 9) 関西地質調査業協会滋賀県支部技術委員会：“滋賀県地盤図” (2005).