

## 岩手県一関市における常時微動観測\*

岩手大学工学部 山本英和 齊藤剛 小田陽子 藤根友博

### 1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震で岩手県一関市では震度6弱を観測した。平成23年4月7日にはM7.1の余震が発生し、一関市で震度6弱を観測した。平成23年8月31日時点での一関市の発表によれば、住宅被害は全壊54棟、半壊587棟一部損壊2966棟にのぼる。落石等の道路被害も1477か所であった。地震被害の原因を把握するために、一関市役所の協力を得て3月の本震と4月7日の余震の際のアンケート震度調査を実施した(山本他, 2013)。

地震時の揺れの差異は表層地盤の影響を強く受けるため、浅部の地盤の振動特性を明らかにし、実際の地震時の揺れの分布と比較することは重要である。そこで、地盤振動特性を調べるために、一関市広域および被害の多数発生した西部赤荻地区において1点3成分常時微動観測を実施した。

また、揺れの差異は表層地盤、特に地表から30m程度の平均表層S波速度(AVS)の影響を強く受けるため、浅部地盤S波速度構造を明らかにし、実際の地震時の揺れの分布と比較することは重要である。そこで、本研究では、超高密度震度調査から得られた空間的な震度分布と浅部地盤S波速度構造の関係を調べるために、一関市中心部において小規模サイズの微動アレー探査を実施した。

### 2. 観測点位置と観測装置

今回の観測では、1点微動観測89地点、微動アレー観測17地点の観測を実施した。図1に観測点位置図を示す。画鋲の点が微動アレーも実施した点である。

観測装置は、岩手大学で所有するレナルツ社製LE-3D/5Sの速度計、白山工業株式会社製DATAMARK LS8800のデータロガー(固有周期5秒)と、(独)防災科学技術研究所から白山工業社製微動観測キットJU210、215の加速度計を使用した。1点微動観測では両方を、微動アレー観測ではJU210、215のみを使用した。

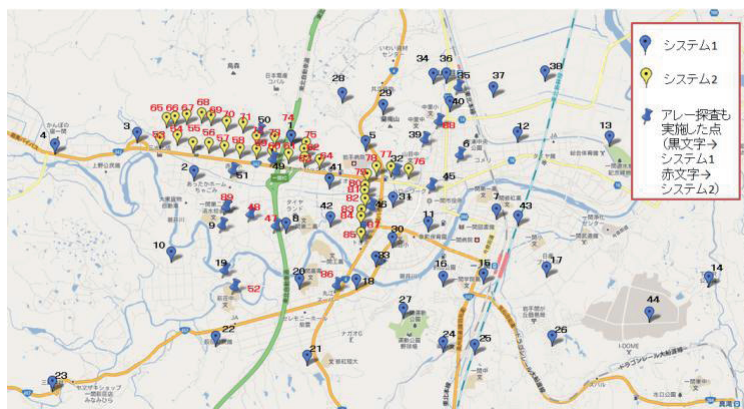


図1 観測点位置図

\* Microtremor observations in Ichinoseki City, Iwate Prefecture by H. YAMAMOTO, T. SAITO, Y. ODA and T. FUJINE

### 3. 1点3成分微動観測

#### 3-1. 観測システム

1点微動では2つの微動観測システムを用いた。レナルツ社製LE-3D/5Sの速度計、白山工業株式会社製 DATAMARK LS8800 のデータロガー（固有周期5秒）を使用して1箇所につき約15分間計49地点の測定を行った（システム1）。LS8800の測定条件は倍率10倍、フィルターはリニア、サンプリング周波数は200Hzである。また、赤荻地区や山目地区、山目町を中心に、白山工業社製微動観測キットJU210、215の加速度計を用いて、1か所につき約20分間計41地点の測定を実施した。センサーが速度計と加速度計が混在するため、振幅分布等の議論が同一条件では困難であるが、卓越周期分布等の初期解析として市域全体の傾向を理解するには十分であると判断した。図2に観測波形の例を示す（システム1）。上からUD（上下動）、NS（南北動）、EW（東西動）の観測波形、それぞれのパワースペクトル、H/Vスペクトル比となっている。

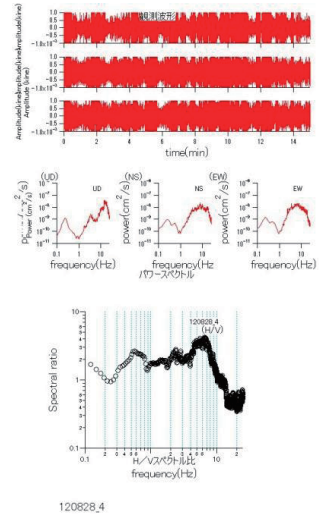


図2 観測波形 (120828\_4)

#### 3-2. 微動のH(水平動)/V(上下動)

すべての観測点でH/Vスペクトル比を計算し、そのピーク値を図3に示した。値の変化を色で示している。白抜きの円は、ピークが見られなかった観測点である。また、1Hz~10Hzの範囲でH/Vの卓越周波数を求め図4に示した。6Hz周辺は赤で示され、10Hzに近づくにつれ青、1Hzに近づくにつれ緑で示している。白抜きの円は、1Hz~10Hzの範囲で卓越周波数が見られなかった観測点である。赤荻地区ではピーク値が、8~10と大きな値の時、卓越周波数も10Hzに近い大きな値であることがわかった。山目町地区ではピーク値が4以下の小さな値の時、卓越周波数も2Hz以下の小さな値であることがわかった。

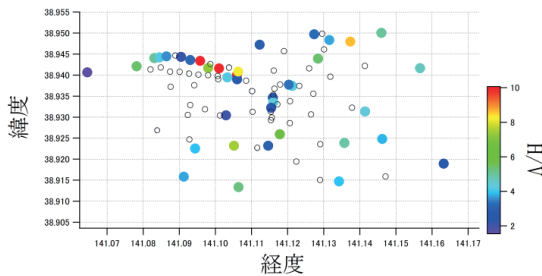


図3 H/Vピーク値の分布

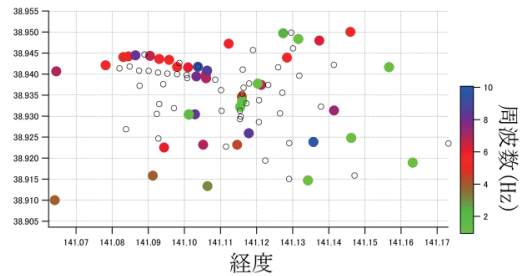


図4 卓越周波数の分布

#### 3-3. 半径平均震度分布との比較

次に、アンケート震度分布とH/Vピーク値、卓越周波数との比較をするために、山本他(2013)の3月、4月のアンケート震度を本研究の微動観測点の半径Rmで平均した震度（半径平均震度）を求めた。500m、400m、300m、250m、200m、100mの平均震度を求めたが、半径が大きいと地域差が出にくく、細かい震度変化が認められない。また、半径が小さいと範囲内にあるアンケートの枚数が極端に少なくなってしまうため、本研究では半径250m平均震度分布を振動特性との比較に使用することにした。

図3と3月本震、4月7日余震の半径250m平均震度分布を比較すると、赤荻地区では震度が5.5~6.0の時、H/Vのピーク値は8~10と大きくなっているが、山目地区では震度6.0付近でH/Vのピーク値が5以下と小さ

くなっていることがわかった。図4と3月本震、4月7日余震の半径250m平均震度分布を比較すると、赤荻地区は震度6.0以上で、6Hzやそれ以上の大きな値になっているが震度5.0～6.0の時3Hz以下の小さな値であることがわかった。

### 3-4. 平均rms振幅と被害分布との比較

次に、被害状況と微動の振幅の関係を調べるために平均rms振幅を求めた。被害状況は一関市役所に教えていただいた宅地被害の地盤沈下と擁壁の損傷の分布(図5)である。平均rms振幅とは、システム1では速度振幅、システム2では加速度振幅から、(1)を使用して計算されるrms振幅を小さい順に並べ替え、車などの外的影響を少なくしたものである。

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \times x(i)} \quad \dots (1)$$

単位はシステム1ではkine, システム2ではGalである。図6がシステム1での平均rms振幅(EW成分)の分布図で、図7がシステム2の平均rms振幅(EW成分)の分布図である。図5と図6を比べると山目町2丁目、3丁目の被害がある場所で、振幅が0.0001～0.0002kineであることが分かった。図5と図7を比べると赤荻地区では被害が多くなっているが0.004Gal以下の小さな値になっている。また、山目地区では、被害が多く、0.008Gal付近の大きな振幅である。このことから山目町、山目地区は振幅が大きい場所で被害が集中しているが、赤荻地区では振幅が小さい場所で、被害が集中していることがわかった。

### 3-5. まとめ

- I. 赤荻地区と山目町地区では被害が大きく震度も大きい。赤荻ではH/Vピーク、卓越周波数が大きい値となり、山目町、山目地区ではH/Vピーク、卓越周波数が小さい値となっている。
- II. 平均rms振幅(EW成分)は、山目町、山目地区は大きい値の場所で被害が集中していたが、赤荻は小さい値の場所で被害が集中していた。

上記の結果より、赤荻地区と山目町、山目地区では、地盤の振動特性に違いがあることがわかった。よって、浅部地盤S波速度構造を知るために微動アレー探査を実施した。



図5 一関市の被害分布図

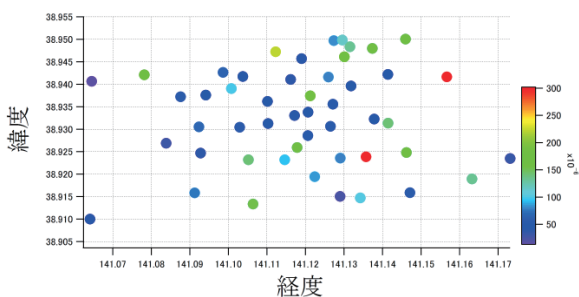


図6 システム2の平均rms振幅の分布図(EW成分)

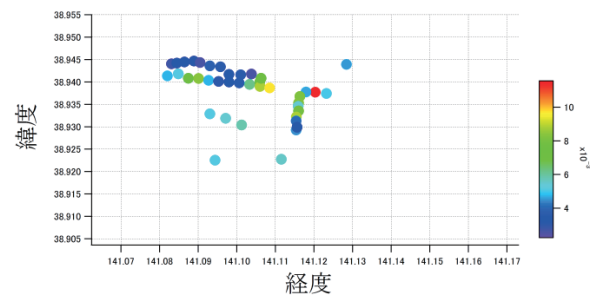


図7 システム1の平均rms振幅の分布図(EW成分)

#### 4. 微動アレー観測

##### 4 - 1. 観測方法

微動アレー観測には JU210、JU215 を 7 台もしくは、6 台使用し、微動計アレー配置は図 8 に示されるように 2 通りの配置で行った。配置①は、7 台使用し、極浅部調査用に半径  $r=60\text{cm}$  の円周上に 3 台、その外側に半径  $R=6\text{m}$  の円周上に 3 台、中心に 1 台微動計を配置。配置②は、6 台使用し、半径  $R=60\text{ cm}$  の円周上に 5 台、中心に 1 台微動計を配置。配置①を基本としたが十分な広さが取れない場合には外側の三角形のサイズを 3m まで縮小して観測を行った。さらに狭い場所では②の配置で観測を行なった。測定時間は 30 分、サンプリング周波数は 200Hz である。観測位置は一関市西部赤荻地区、山目町地区の広い公園を中心に選定したが、公園が無い場合、地面がぬかるんでいる場合などでは近くの路上などで観測を行ない、図 9 に示されるように全 17 地点で観測を実施した。

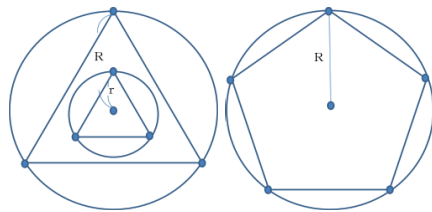


図 8 微動計アレー配置 (左①、右②)

##### 4 - 2. 位相速度と平均表層 S 波速度 (AVS)

位相速度の解析には空間自己相関法を利用した。測定された上下動微動を 10.24 秒の区間に分割しクロススペクトルを算定、平均して空間自己相関係数  $\rho(f_0, r)$  を算出し、0 次のベッセル関数  $J_0$  に近似してレイリー波の位相速度  $c(f_0)$  を計算した (2)。

$$\rho(f_0, r) = J_0 \left\{ \frac{2\pi f_0 r}{c(f_0)} \right\} \dots (2)$$

配置①の場合は内側の極小アレーと外側の大アレーとで別々に位相速度を計算し、配置②の場合は五角形アレーとして位相速度を計算した。図 10 は観測点 No. 10 における位相速度であり、2 つの 3 角形それぞれから位相速度を計算したため 2 つの観測位相速度分散曲線を求められたが、五角形アレーの場合は 1 つしか観測位相速度分散曲線を求められない。この位相速度から、長尾・紺野 (2002) の方法を用いて平均表層 S 波速度 (AVS) を推定した。波長 15m、20m、30m、40m の位相速度をそれぞれ AVS10、AVS15、AVS20、AVS30 とした。図 11 の実線は傾きの大きい順にそれぞれ 40m、30m、25m、20m、15m の波長に相当し、観測位相速度分散曲線との交点から AVS を読み取った。



図 9 観測点位置図

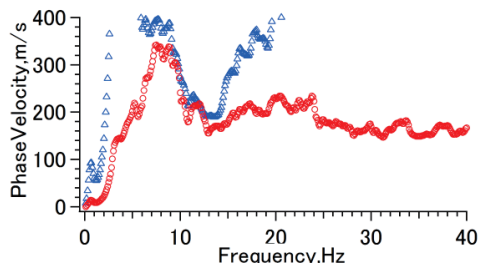


図 10 観測位相速度分散曲線 (△外側、○内側)

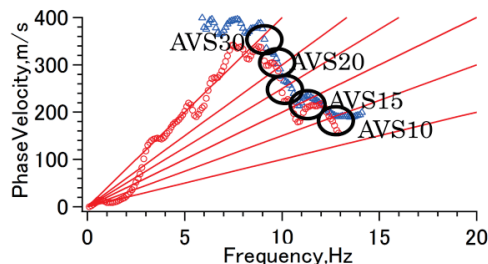


図 11 表層 S 波速度の読み取り

ただし、微動計間隔の関係より計算された観測位相速度分散曲線では推定困難な波長領域や、明らかに不自然な観測位相速度分散曲線となった場合は、その周波数における AVS は無視する。推定された AVS を表 1 に示す。西部赤荻地区では、波長 10m の S 波速度は小さいが、波長 25m の S 波速度は 10m の 2 倍程度まで大きくなっている。山目町地区では、どの波長においても S 波速度が小さく示された。図 12 は表 1 を空間的に示したものであり、山目町地区は他点より S 波速度が遅く示されることがわかった。

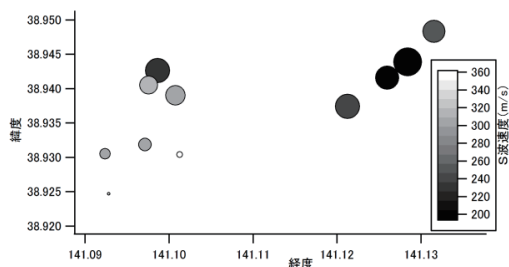


図 12 表層 S 波速度空間分布(波長 20m)

#### 4-3. アンケート震度による半径平均震度と平均表層 S 波速度 (AVS) との関係

半径平均震度は半径 125m、200m、250m、500m で計算した。これを、3 月の本震、4 月の余震それぞれで算出し AVS との相関を調べた。図 13 は AVS20 と半径 250m の半径平均震度との相関を示したものである。3 月は震度が大きくなれば AVS が遅くなるという負の相関がみられるが、4 月はあまりみられない。相関係数はそれぞれ、3 月が -0.87、4 月が -0.44 であった。

表 1 推定表層 S 波速度

観測点No	観測点名	表層 S 波速度 (m/s)					
		波長 10m	波長 15m	AVS15	波長 25m	AVS20	AVS30
No.1	消防コミュニティセンター	150	190	235	275	300	—
No.2	一関市変電所前	190	260	310	340	—	—
No.3	酒のちば駐車場	180	240	300	350	405	500
No.4	萩野西公園前歩道	—	—	—	—	—	—
No.5	萩野公園	225	280	305	345	—	430
No.6	松ノ木公園	270	290	360	395	450	440
No.7	清水部落公民館	—	—	—	—	—	—
No.8	谷起島公民館	290	330	345	395	400	400
No.9	萩荘小学校グラウンド	—	190	210	250	290	—
No.10	町浦北公園前広場	163	210	250	270	290	325
No.11	中里児童公園	123	160	200	225	245	365
No.12	配志和神社前道路	155	170	200	225	—	—
No.13	町浦南公園	—	—	—	350	370	400
No.14	寺前公園	150	190	240	295	325	—
No.15	一関消防署駐車場	—	—	—	—	—	—
No.16	十二神宿舎	—	—	195	230	265	335
No.17	高梨公園前道路	—	—	—	—	—	410

3 月、4 月それぞれ各半径における半径平均震度と AVS との相関を表 2 に示す。3 月、4 月ともに AVS20 において最も高い相関が示された。また、半径平均震度の半径が大きくなるにつれて相関がみられなくなることがわかった。

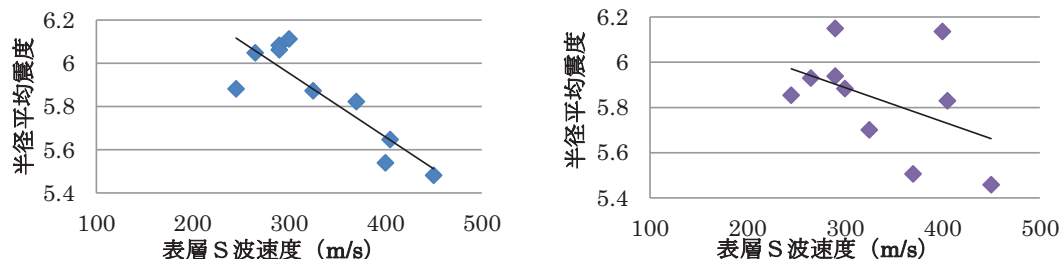


図 13 半径平均震度 ( $r=250m$ ) と表層 S 波速度 (AVS20) の相関グラフ、(左 3 月、右 4 月)

表2 AVS と半径平均震度との相関係数 (左3月、右4月)

	avs10	—	avs20	avs30		avs10	—	avs20	avs30
半径(m)	波長15m	波長25m	波長30m	波長40m	半径(m)	波長15m	波長25m	波長30m	波長40m
125	-0.07	-0.74	-0.80	-0.74	125	-0.07	-0.02	-0.09	-0.04
200	-0.80	-0.79	-0.79	-0.53	200	-0.63	-0.65	-0.75	-0.44
250	-0.73	-0.75	-0.87	-0.68	250	0.00	-0.09	-0.44	-0.20
500	-0.06	-0.34	-0.48	-0.13	500	-0.27	-0.06	-0.20	-0.13

#### 4 - 4. まとめ

西部赤荻地区の AVS10 は約 230m/s と小さいが、AVS20 は約 400m/s と大きい。山目町地区では AVS10 は約 180m/s、AVS20 は約 290m/s とどちらも小さい。平均表層 S 波速度より西部赤荻地区は表層地盤の極浅部に軟弱な層が堆積していて、そのすぐ下に固い層が堆積していると推測され、山目町地区は表層地盤に軟弱な層が堆積していると考えられる。3月の地震における半径平均震度と AVS が負の相関を持つが、4月の地震においてはあまり相関がみられない。また、AVS10 や AVS20 で強い相関がみられたことから、地下浅部が軟弱地盤だと考えられ、震度、被害に大きく影響していると推察できる。半径 500m の半径平均震度において、著しく相関が見られなくなることから、一関市は地域による震度差が大きいと考えられる。

#### 5. 結論

赤荻地区と山目町地区では被害が大きく震度も大きいことがわかった。一関市西部の赤荻地区では H/V ピーク・卓越周波数が大きい値となる。さらに、AVS が小さいところでは S 波速度が小さく、AVS が大きいところでは S 波速度は大きくなる。それに対して、山目町地区では H/V ピーク・卓越周波数が小さい値となり、各 AVS において S 波速度が比較的小さく出ている。以上の結果より、西部赤荻地区は表層地盤極浅部に軟弱層が存在し、そのすぐ下に固い地盤が堆積していると考えられ、山目町地区はある程度深部まで軟弱層が存在していると推察された。

また、西部赤荻地区において地震時の揺れやすさを表わす  $rms$  振幅が小さく示されたにも関わらず、被害が多数見受けられたのは、地下浅部に堆積している軟弱な層による影響ではないかと推察される。

#### 謝辞

(独) 防災科学技術研究所から微動観測キットをお借りしました。記してここに謝意を表します。

一関市役所の職員の皆様には一関市における常時微動観測の便宜を図っていただきました。記してここに謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 長尾毅, 紺野克昭 (2002) : 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp. 225-235.
- (2) 山本英和, 齊藤剛, 大河原正文, 宇部陽子, 齊藤良平, 一戸欣也, 菊池薫 (2013) : 東北地方太平洋沖地震とその余震を対象とした岩手県一関市における超高密度アンケート震度調査, 東北地域災害科学研究集会, 第 49 巻, 掲載予定
- (3) Aki, K. (1957) "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors." Bull. Earthq. Res. Inst., No. 35, pp. 415-456.