

Estimation of surface ground structures in Kanazawa region based on short period microtremors

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Ikemoto, Toshikazu, Yamashita, Junya, Nagai, Toshiki, Nishikawa, Hayato, Miyajima, Masakatsu, Kitaura, Masaru メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00029550

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



短周期微動に基づく金沢市域における地盤構造の推定

池本敏和¹, 山下順也², 長井俊樹³
西川隼人⁴, 宮島昌克¹, 北浦勝¹

(2003年8月29日受付, Received August 29, 2003)

(2003年9月11日受理, Accepted September 11, 2003)

Estimation of surface ground structures in Kanazawa region based on short period microtremors

Toshikazu IKEMOTO¹ · Junya YAMASHITA² · Toshiki NAGAI³
Hayato NISHIKAWA⁴ · Masakatsu MIYAJIMA¹ and Masaru KITAURA¹

1. はじめに

石川県では過去30年間の有感地震が全国で最も少ない。しかしながら, 2000年6月7日に石川県西方沖地震が発生したこと, 国の地震調査委員会による調査の結果, 今後30年以内に森本・富樫断層を震源とする震度6以上の地震が起こる可能性が最大5%と予測されたことは, 石川県における震災対策の重要性を示唆しているものと言える。

地震動の大きさは震源, 伝播経路, 局所的地盤条件の相互効果によって決定される。特に沖積平野においては, 局所的地盤条件が地震動に及ぼす影響は大きく, 表層の地質構造によっては, 地震動が大きく増幅することが知られている。地盤の動特性を把握する方法には, PS検層試験及び標準貫入試験など地盤を直接掘削する方法や反射法などの地震探査法があり, 前者は主に表層地質を,

後者は主に深層地質を対象としている。しかし, いずれの方法もコストが嵩むため, 多くの点で実施することは難しい。そこで, 比較的容易に実施することができる常時微動観測から地盤の動特性を推定することが有用となる。

常時微動から地盤の動特性を推定する研究は, 着目する周期領域により1) 短周期微動, 2) やや長周期微動の2つに分けられる。短周期微動は主に表層地盤の動特性, やや長周期微動は主に深層地盤の動特性を推定するために用いられている。

短周期微動は比較的簡単に観測できるため, これを利用して表層地盤の動特性を推定しようとする研究^{1), 2)}が多く行われている。現在最も一般的に用いられているのは, 1地点で得られた水平動スペクトルの卓越周期に注目して, 地盤のせん断振動の1次固有周期を推定する方法である。しかし, この方法から得られた水平動スペクト

¹ 金沢大学工学部土木建設工学科 : Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Kanazawa University

² 石川県庁 : Ishikawa Prefecture

³ 東京工業大学大学院総合理工学研究科 : Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

⁴ 金沢大学大学院自然科学研究科 : Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

ルは観測点の地盤特性を反映する場合と、周辺の振動源特性を反映する場合とがある。このため、水平動スペクトルから得られる周期が地盤の固有周期と常に対応するとは限らず、周辺の振動源特性に依存しない地盤固有の情報を常時微動から評価する必要がある。

中村・上野³⁾は1点で観測される常時微動の水平動スペクトルを鉛直動スペクトルで除した振幅比（以下、H/Vスペクトル比と呼ぶ）を用いることで、周辺の振動源特性を除去した地盤の固有周期推定法を提案した。また堀家⁴⁾は、常時微動のH/Vスペクトル比の周期特性がレイリー波のそれを反映し、地盤動特性の推定に利用できる可能性を示した。また、時松・宮寺⁵⁾は、短周期微動のH/Vスペクトル比の周期特性がレイリー波の特性をよく反映していること、およびH/Vスペクトル比が最大となる周期が地盤の固有周期に一致する可能性のあることを示した。

深層地盤の動特性を推定する研究は、主に高層建物や長大構造物の耐震設計と関連づけて行われている。しかし、兵庫県南部地震の際に見られた「震災の帯」と呼ばれる大被害地域は、深層地盤の動特性と密接な関係があること^{6), 7)}が示され、表層地盤の動特性だけではなく、深層地盤の動特性も地震による被害に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなっている。このような深層地盤の動特性を推定する方法として、常時微動の周期約5秒から10秒までの「やや長周期」領域に着目した研究が行われてきた。特に、水平アレイ観測により常時微動を

構成する表面波の分散曲線を求め、それに基づく逆解析により地盤構造を同定する研究が盛んに行われてきた⁸⁾。また、個々の地点で独立に観測した常時微動のH/Vスペクトル比を地盤構造と関係づけることによって深層地盤の動特性を推定する研究も行われている^{9), 10)}。アレイ観測とスペクトル比による手法の適用性を比較すると、前者が狭い地域の平均的な地盤特性を求めることが可能であるのに対し、後者は観測が比較的容易であるため、多地点で観測することにより広い地域における地盤特性の評価に適していると言える。

本研究においては金沢市域を対象に、表層の地盤構造が既知な地点で常時微動観測を行うことによって、得られたH/Vスペクトル比を用いて、短周期領域における地盤の周期と地盤層厚との関係を明らかにするとともに、金沢市域における地盤の卓越周期分布を推定した。

2. 常時微動の測定方法

地盤上の常時微動の振幅は数マイクロン程度である。この極めて小さい振動を測定するために高感度の携帯用振動計を用いた。また観測場所が屋外であるため電源として12Vバッテリーを用いた。各機器の構成を図1に示す。移動観測に当たっての効率性を考慮し、これらの測定システムを車中に設置した。測定中には車のエンジンを止め、車からのノイズが発生しないように配慮した。

以下に各測定機器の詳細について述べる。

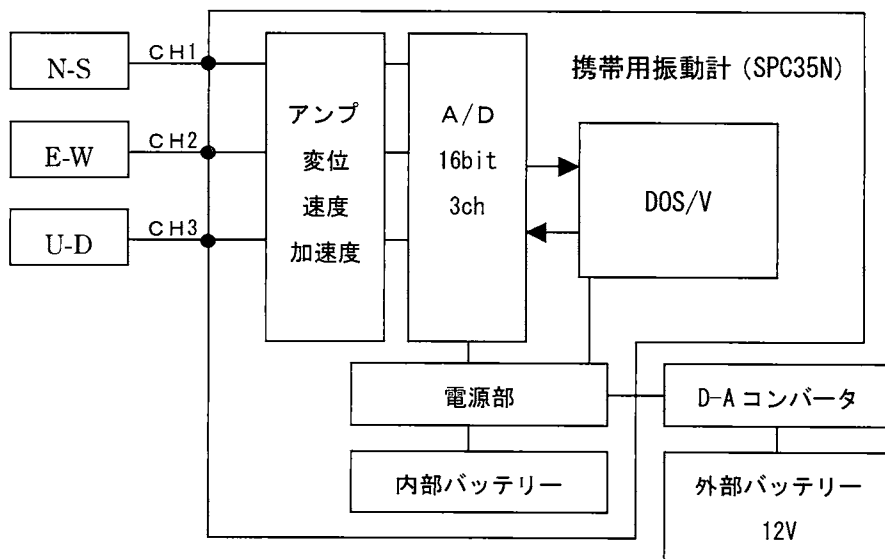


図1 測定システムの構成図

2. 1 携帯用振動計の概要

携帯用振動計（東京測振 SPC-35N）はA/D変換部とノートパソコン部により構成されている。A/D変換部は、振動特性、ハイパスフィルタ、A/D変換に分けられる。

(1) 振動特性

一般に常時微動の測定には、速度記録の方が加速度記録に比べノイズを拾いにくいことなどから、速度記録が用いられることが多い。そこで本研究においても速度記録を対象にデータを収録した。なお、常時微動計の総合特性は地盤動特性の推定に影響を及ぼす。今回用いた常時微動計の総合特性は、周期3秒以下において感度が100%、周期5秒では約85%、周期10秒では約35%である。本研究で対象とする短周期はせいぜい1秒程度であるので、その周期範囲での感度は100%である。

(2) ハイパスフィルタ

測定機器の電源にはバッテリーを用いているので、電圧低下が生じる可能性がある。電圧低下は信号の長周期領域に現れ、このノイズを除去するためにハイパスフィルタを用い、0.1Hz以下の信号成分を除去する。

(3) A/D変換

速度計から得られたアナログデータをデジタルデータに変換する必要がある。本研究で対象とする周期は約0.1秒から数秒程度であるので、サンプリング周波数を100Hzに設定した。すなわち、アナログデータを0.01秒間隔でコンピュータに読み込ませ、60,000点（=10分間）の地盤における速度波形を記録した。

観測は水平2方向（NS, EW）および鉛直方向（UD）の3成分とした。常時微動計を設置する場所としては、できる限り地面が露頭しているところを選択した。また、測定場所に近い所で

の自動車や機械類のノイズを記録しないように測定は夜中に行い、地盤特性を十分に表していると思われる記録を取るように心がけた。

2. 2 常時微動の解析方法

常時微動から得られた波形を処理するための解析方法を以下に示す。

1成分に対し60,000点の観測データから、記録が安定している部分を抽出し、2,048点（20.48秒）を1単位とする10組のデータを作成した。これら10組のデータをフーリエ変換の後、加算平均し、バンド幅0.3Hzで平滑化を行った。次に、得られた水平2成分のフーリエスペクトル振幅を相乗平均し、水平動の平均スペクトル振幅を S_H とした。最後に、 S_H を鉛直成分のフーリエスペクトル振幅 S_V で除し、H/Vスペクトル比（ S_{HV} ）を求めた。

2. 3 地盤の周期特性と表層地盤構造との関係

ここでは、地盤構造（各地点における沖積層厚）が既知な測線に沿った常時微動結果より、地盤の周期特性を把握するとともに、その周期特性と表層地盤構造との関係について検討した。そのために石川県平野部の地盤図集から3測線を選択した。各測線及び常時微動観測点の配置を図2に、各測線の地盤構造を図3に示す。沖積層厚は石川県平野部の地盤図集から求めている¹¹⁾。

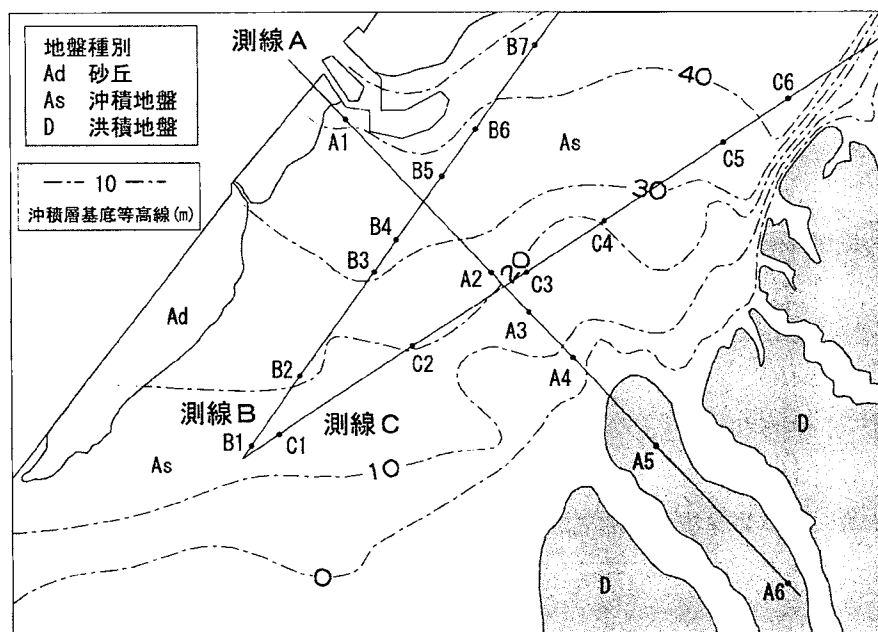
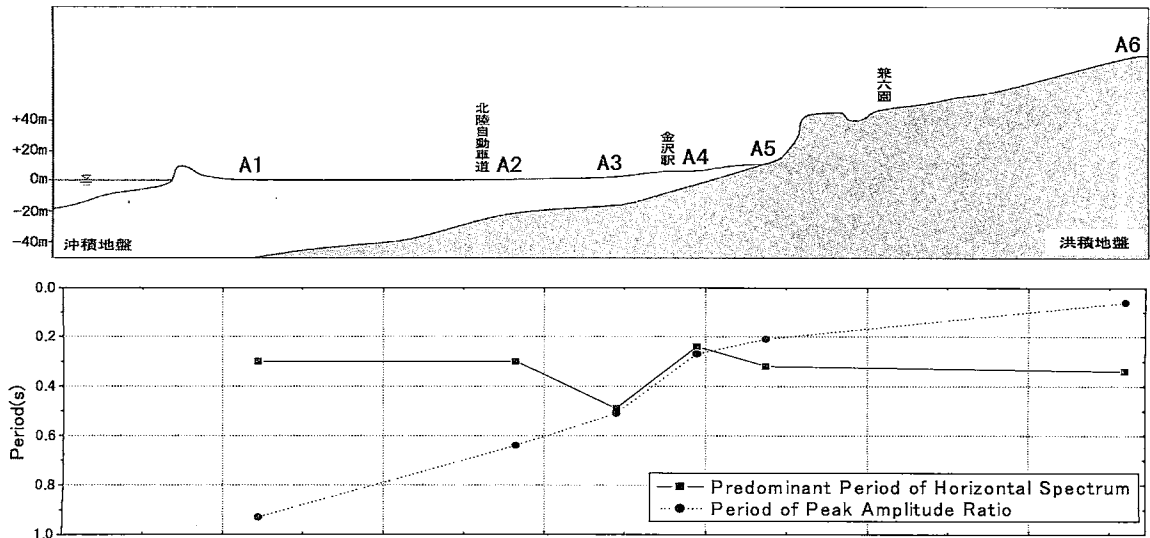
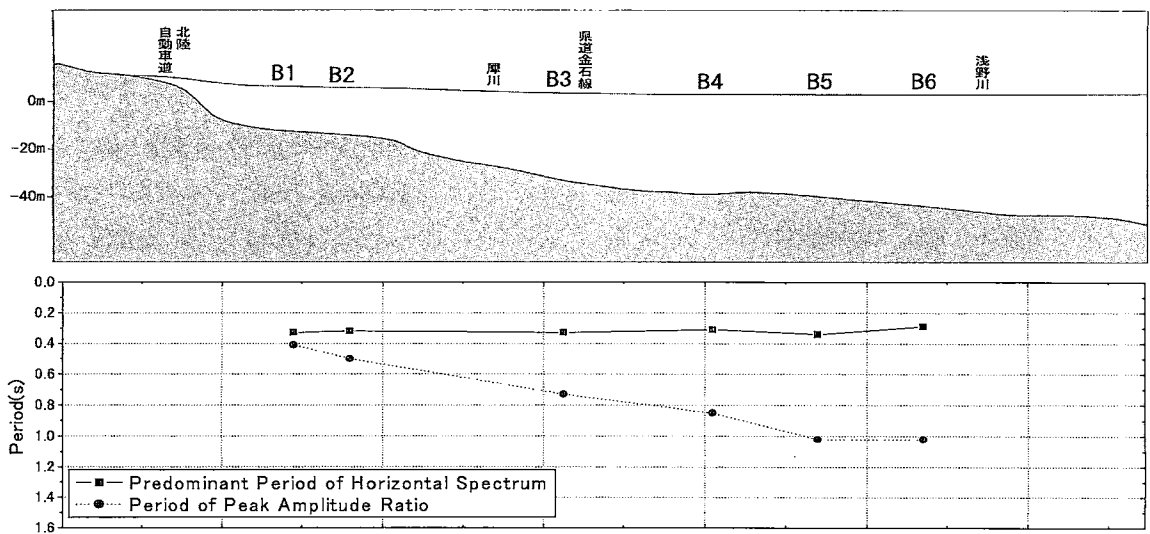


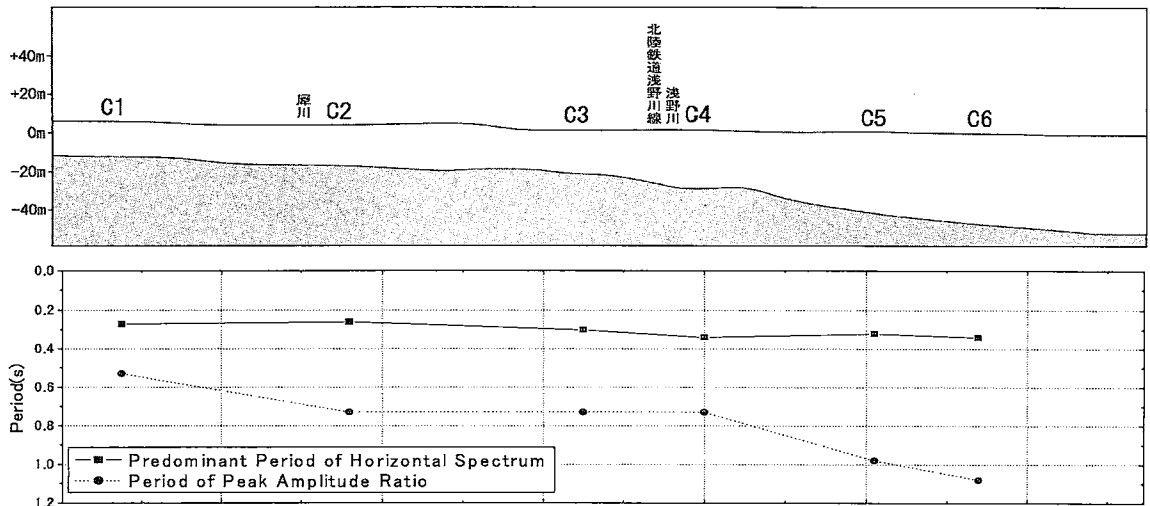
図2 各測線の配置図



(a) 側線 A



(b) 側線 B



(c) 側線 C

図3 地盤構造と常時微動の水平動の卓越周期及びH/Vスペクトル比から得られる周期の関係

以下に各測線の特徴を述べる。

(1) 測線 A

測線 A は金石から兼六園を通り小立野に向かって走る測線である。サイト A1 では沖積層厚が約 40m と厚く、サイト A5 に行くにしたがい沖積層の厚さが薄くなっている。また、サイト A6 は測線 A の観測点において洪積地盤上に位置する。

(2) 測線 B

測線 B は手取扇状地の端から犀川、浅野川を横断し、河北瀧に向かって走る測線である。サイト B1 からサイト B6 へと番号が大きくなるにしたがい沖積層厚が厚くなる。

(3) 測線 C

測線 C は手取扇状地の端から犀川、浅野川を横断し、森本まで走る測線である。測線 B と同様にサイトの番号が大きくなるにしたがい沖積層厚が厚くなる。しかし測線 C では、測線 B と比較してサイト C1 からサイト C4 に至る沖積層厚の変化の度合いは小さく、サイト C6 の近くでは沖積層の厚さが急激に変化している。

3. 金沢市域における表層地盤特性の推定

3.1 地盤構造と常時微動の周期特性との関係

地盤構造と H/V スペクトル比から得られる周期の関係を図 3 に示す。ここでは常時微動から得られる水平動の卓越周期も参考のために掲載した。水平動の周期には表れていないが、沖積層厚が厚くなるにつれて H/V スペクトルの周期は大きくなる傾向にある。測線上における全サイト常時微動の H/V スペクトル比の周期と沖積層厚との関係を図 4 に示す。同図には、参考のために 4 分の 1 波長則から求めたせん断波速度 150m/s に対する地盤の卓越周期と沖積層厚との関係を示した。H/V スペクトル比の周期は沖積層厚が厚くなるほど大きくなり、卓越周期の直線はほぼ同様の傾向を示している。したがって、常時微動の H/V スペクトル比の周期は水平動のそれと比べ周辺の振動源の影響を受けにく

く、表層地盤特性を反映していると言える。

3.2 表層地盤における卓越周期分布の推定

H/V スペクトル比から地盤の卓越周期を推定できることがわかった。そこで、各地点の常時微動観測から得られた H/V スペクトル比を用いて、表層地盤における卓越周期分布を推定する。

常時微動から得られた金沢市域における表層地盤の卓越周期分布を図 5 に示す。卓越周期の分類に当たっては、道路橋示方書¹²⁾の地盤分類を参考に表 1 のように設定した。まず、卓越周期 T を道路橋示方書の地盤分類をもとに $T < 0.2$ 秒 (1 種地盤), $0.2 \text{ 秒} \leq T < 0.6$ 秒 (2 種地盤), $T \leq 0.6$ 秒 (3 種地盤) に分類し、さらに 2 種地盤を $0.2 \text{ 秒} \leq T < 0.4$ 秒, $0.4 \text{ 秒} \leq T < 0.6$ 秒の 2 つに、3 種地盤を $0.6 \text{ 秒} \leq T < 0.8$ 秒, $0.8 \text{ 秒} \leq T < 1.0$ 秒, $1.0 \text{ 秒} \leq T$ の 3 つに分類した。ここで、1 種地盤は良好な洪積地盤および沖積地盤、2 種地盤は 1 種および 3 種のどちらにも属さない沖積地盤、3 種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤である。沖積層厚が 20m 以上の地域は卓越周期 0.6 秒以上の 3 種地盤であり、その他の地域においては、2 種地盤である。今回常時微動観測を行った金沢市域は主に 2 種、3 種の地盤であることがわかる。中心部から北東にある沖積層基底等高線の間隔が狭い地域では、他地域と比較して卓越周期が 0.4 秒から 1.0 秒以上に大きく変化している。このように狭い地域内でも卓越周期が異なる理由としては、沖積層の中に硬い層などが含まれる可能性や、工学的基盤が傾斜し

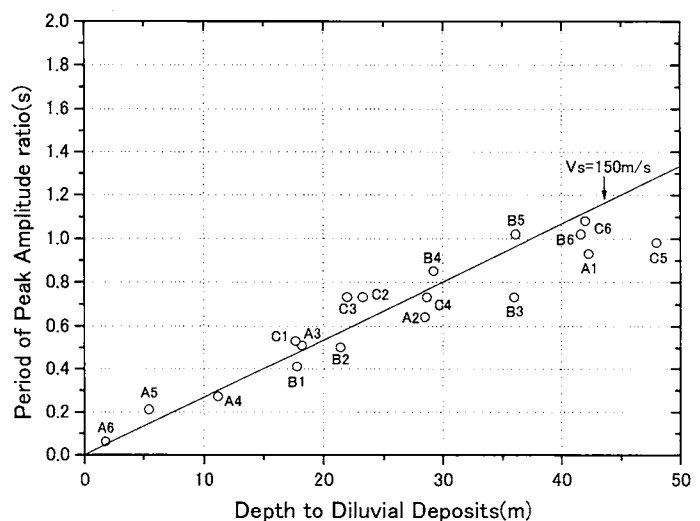


図 4 微動の H/V スペクトル比から得られる周期と沖積層厚との関係

ていることが考えられる。

以上の結果、金沢市域における表層地盤の卓越周期分布に沖積層厚が影響しており、工学的基盤面が傾斜していると思われる部分において卓越周期が大きく変化することが確認された。

次に、図5にH/Vスペクトル比にピークが見られなかった観測点を※印で示した。ピークが見られなかった観測点は、工学的基盤と表層地盤のインピーダンス比が小さいことが考えられる。同様に、金沢市域におけるピークが見られなかった地域は地震動が増幅する可能性が小さい地域であり、明瞭なピークが見られた地域は表層と基盤のインピーダンス比が大きく、地震動が増幅する可能性が高いと考えられる。

3. 3 石川県西方沖地震における表層地盤特性

2000年6月7日に発生した石川県西方沖地震では、金沢市のアンケート震度が各町丁目別で得られている。そこで一例ではあるが、アンケート震度分布と常時微動から評価した金沢市域における表層地盤の動特性との関係について検討する。

(1) 石川県西方沖地震

2000年6月7日午前6時16分に発生した石川県西方沖地震のマグニチュードは6.1であり、1993年に発生した

表1 卓越周期の分類 (道路橋示方書による¹²⁾)

地盤種別	卓越周期 (T)	地盤概略
1種	$T < 0.2$	良好な洪積地盤および沖積地盤
2種	$0.2 \leq T < 0.4$	1種および3種のどちらにも属さない洪積地盤および沖積地盤
	$0.4 \leq T < 0.6$	
3種	$0.6 \leq T < 0.8$	沖積地盤のうち軟弱地盤
	$0.8 \leq T < 1.0$	
	$1.0 \leq T$	

能登半島沖地震のマグニチュード6.6に比べれば規模は小さいものの、近年の北陸の地震としては比較的大きなものであった。震源位置は石川県小松市の西方沖約80km (北緯36.8度, 東経135.5度), 震源深さは22kmである。気象庁から発表された金沢市の震度は3である。

(2) アンケート震度¹³⁾

アンケート震度算定には、太田らによって提案されたアンケート調査票を用いた。この調査票には40問の質問があり、その回答から回答者1人につき1つのアンケート震度が算出されるようになっている。金沢市全域ではアンケートの回答数が少ない地域が存在するため、3以上の回答数が得られている町丁目におけるアンケート震度を用いることとした。また、町丁目の中でも得られたアンケート震度にはばらつきがあるため、それらを平均化することにより、1つの町丁目のアンケート震度とした。

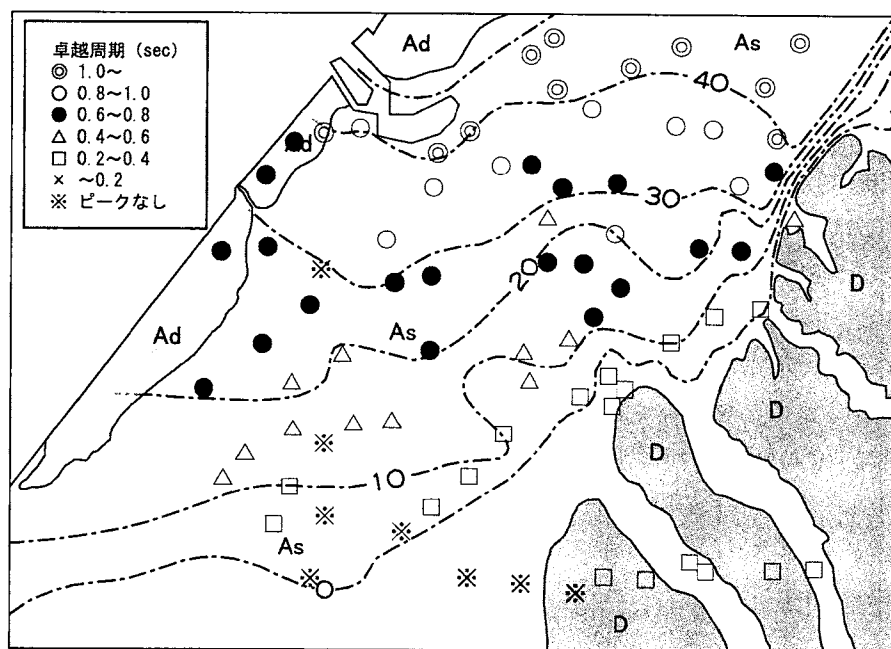


図5 金沢市域における表層地盤の卓越周期分布

(3) アンケート震度分布

得られたアンケート震度分布を図6に示す。同図に示すように金沢市の南東に位置する洪積層上や洪積層と沖積層の境界付近では、金沢市の北部に位置する沖積層上と比べて震度は小さくなっていることがわかる。石川県西方沖地震の震源は、常時微動観測を行った範囲からは約110km離れており、震源特性、伝播特性を同一とみなすと、震度の違いは主に表層地盤の動特性によって生じたと言える。

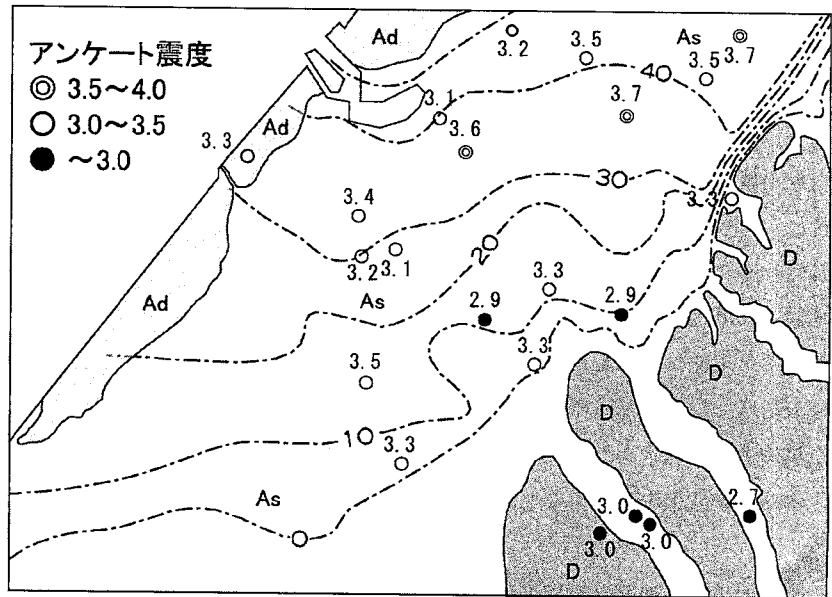


図6 2000年石川県西方沖地震における金沢市のアンケート震度分布

(4) 金沢市におけるアンケート

震度分布と地盤の卓越周期分布との比較

アンケートから得られた震度と常時微動から得られた地盤の卓越周期分布との比較を図7に示す。卓越周期が大きくなるにつれてアンケート震度も大きくなる傾向が見られる。したがって地盤の卓越周期と震度にはある程度相関があると言える。

2000年石川県西方沖地震の際に、KiK-Net¹⁴⁾で観測された金沢市における基盤面での速度波形(EW方向)のフーリエスペクトルを図8に示す。同図から、周期1秒付近に最も卓越したピークが現われているが、短周期の成分(振動数に換算して1から5Hzまで)も含まれていることがわかる。このことから、石川県西方沖地震では金沢市域と震源との距離が遠いため6Hz以上の成分の波が減衰し、それ以下の成分を含んだ地震動が地盤の比較的やわらかな沖積層厚と関係し、固有周期の大きな地盤ほど地震動が増幅したためと考えられる。

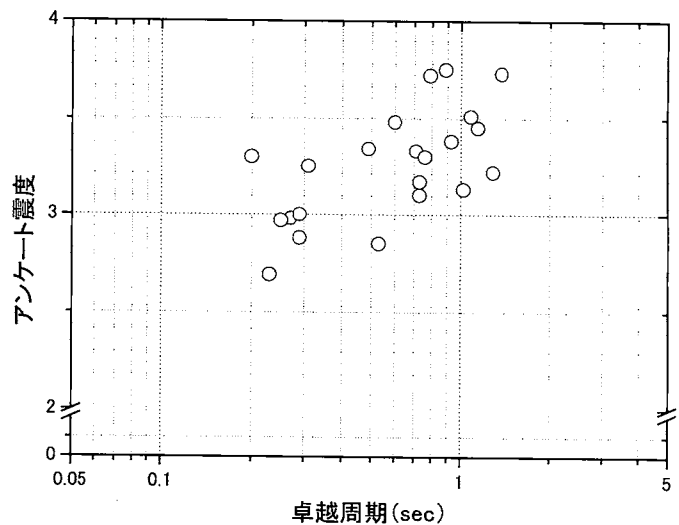


図7 金沢市域における微動の卓越周期とアンケート震度の関係

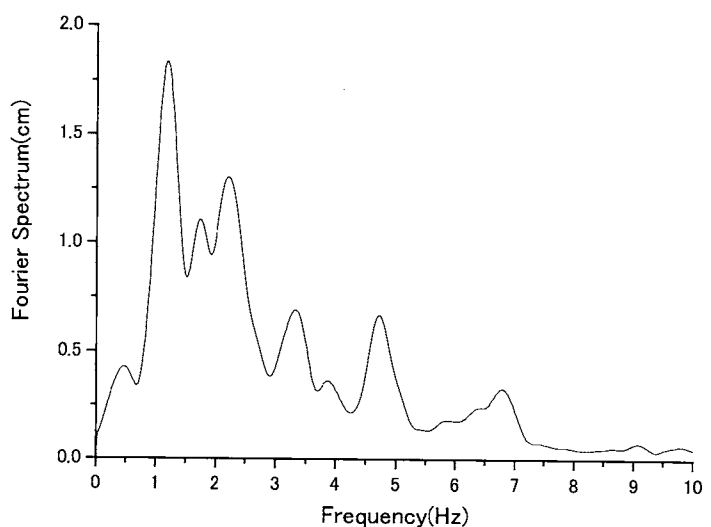


図8 2000年石川県西方沖地震において金沢市の基盤面で観測された波形のフーリエスペクトル

4. ま と め

参考文献

本研究では、3つの測線で得られた常時微動観測から金沢市域における短周期微動の周期特性について考察を行った。その結果、H/Vスペクトル比が地盤構造を反映していることを確認し、H/Vスペクトル比から得られる地盤周期は地盤の固有周期と相関が高いことから、常時微動から地盤動特性を推定できることを示した。また、金沢市域における常時微動の周期特性から、表層地盤の卓越周期分布を求めた。

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- 1) 金沢市域の地盤卓越周期は、沖積層厚の変化とともに手取扇状地の端から河北潟に向かうにつれて大きくなる傾向が見られる。
- 2) 沖積層基底等高線の間隔が狭い地域、すなわち工学的基盤面が傾斜していると思われる地域では、狭い範囲でも卓越周期が変化する。
- 3) 常時微動から求めた表層地盤の卓越周期と石川県西方沖地震におけるアンケート震度との関係を検討した結果、震源の比較的離れている地震に関しては卓越周期とアンケート震度には相関があることを示した。

本研究では、地盤動特性を推定するに当たり周期1秒以下を考えた。今後、長周期領域(10秒程度)まで測定できる機器を用いることにより、さらに深い地盤の動特性を推定する予定である。

最後に本研究を実施するに当たり、財団法人前田記念工学振興財団より助成を受けた。ここに感謝の意を表します。

- 1) Aki, K : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bulletin of Earthquake Research Institute, **35**, pp. 415-456, 1957.
- 2) Kanai, K. and Tanaka, T : On microtremor VIII, Bulletin, Earthquake Research Institute, **39**, pp. 97-114, 1961.
- 3) 中村 豊・上野 真 : 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 265-270, 1986.
- 4) 堀家正則 : 微動の位相速度及び伝達関数の推定, 地震第2輯, **32**巻, pp. 425-442, 1980.
- 5) 時松孝次・宮寺泰生 : 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第**439**号, pp. 81-87, 1992.
- 6) 入倉孝次郎 : 阪神・淡路大震災の地震動と被害の関係, スマート構造研究委員会, 第5回定例会, 1995.
- 7) 川瀬 博 : 堆積盆地が強震動に与えた影響—メキシコシティの場合と神戸市の場合—, 第23回地盤震動シンポジウム, pp. 83-92, 1995.
- 8) 松島 健・岡田 広 : 長周期微動を用いた地下構造の推定—周波数-波数法による位相速度推定に必要な各種パラメータの検討—, 北海道大学地球物理学研究報告, Vol. **52**, pp. 1-10, 1989.
- 9) 山中浩明・西村雅之・石田 寛・池浦友則・野澤 貴・佐々木透・丹羽正徳 : 首都圏西部におけるやや長周期微動のアレ観測とS波速度の関係, 地震, 第2輯, 第**47**巻, pp. 163-172, 1994.
- 10) 小林喜久二 : やや長周期微動による深い地盤構造の推定に関する研究, 東京工業大学博士論文, 1981.
- 11) 建設省北陸地方建設局 : 石川県平野部の地盤図集, (社)北陸建設弘済会, 1982.
- 12) 日本道路協会 : 道路橋設計示方書・同解説V 耐震設計編, 丸善, p. 90, 1990.
- 13) 太田 裕・後藤典敏・大橋ひとみ : アンケートによる地震時の震度の推定, 北海道大学工学部研究報告, No. **92**, pp. 241-252, 1979.
- 14) 防災科学技術研究所 : KiK-Net 観測データ, <http://www.bosai.go.jp/jindex.html>.