

秋田県能代市における地盤の振動特性 (1)

—微地形・地質および日本海中部地震(1983年)による地盤災害と微動特性との関係—

微動研究グループ

斎藤 徳美*・阿部 司**・小林 直太^{3*}
中島 直吉^{4*}・中村 操^{5*}・野越 三雄^{6*}
毎熊 輝記^{7*}

Study on the Ground Vibration Characteristics in Noshiro City, Akita Prefecture (1)—Relationships between Short-period Microtremors and Microtopography, Subsurface Geology, and Ground Damage by the 1983 Nihonkai-chubu Earthquake—By Research Group for Short- and Long-period Microtremors (Tokumi SAITO, Mamoru ABE, Naota KOBAYASHI, Naoyoshi NAKAJIMA, Misao NAKAMURA, Mitsuo NOGOSHI and Teruki MAIGUMA)

The 1983 Nihonkai-chubu earthquake occurred off Noshiro City, Akita prefecture, Japan on May 26, 1983. Damage due to soil liquefaction was found at many sites in Noshiro City and areas heavily damaged by soil liquefaction were located between sand-dune and soft alluvium with a very shallow level of ground water. The results of investigations on the characteristics of microtremors around Noshiro City, which suffered great damage, were described in conjunction with S-wave velocities of ground surface, geological conditions (microtopography and subsurface geology) and the areas damaged by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake. The short-period microtremors were measured at sites in the above areas by 3-component seismometers with a natural period of 1 sec. connected to amplifiers and data recorders in field, and were analysed by means of micro-computer in laboratory. The digitized time Δt of microtremors was taken equally at 0.02 sec., considering the frequency range (1-25 Hz) under investigation. Fourier spectra were calculated by means of FFT from 2048 digitized data of wave forms of microtremors. Overall frequency characteristics were flat between about 1.0 and 25 Hz.

Results of this investigation are as follows:

- 1) All spectra of the microtremors were classified into four types (A, B, C and D) for about 1.0 to 10 Hz. Type A has a single peak below 1.5 Hz in the spectra, type B has a single peak below 1.5 Hz and a peak from 2.0 to 3.0 Hz, type C has a peak from 2.0 to 3.0 Hz, and type D has plural peaks from 1.0 to 10 Hz. Furthermore, a different classification type a and b, from the previous one, type A, B, C, and D were examined from the point of view of soil liquefaction as a peculiar damage. The type a has peaks above 4 Hz in the spectra and the type b has no peak there.
- 2) Average amplitudes of microtremors are particularly small at terrace, and they are slightly larger at natural levee and point bar than at terrace. Type A of microtremor spectra is found mostly at terrace and type B tends to be found more at older alluvial soil.
- 3) Type a of microtremor spectra is measured mostly in areas damaged by soil liquefaction. The spectral peaks at frequencies higher than 4 Hz are found to be related to large velocity contrast between layers. Therefore, microtremor measurements can be useful to estimate the damage due to soil liquefaction in earthquakes.

1. 緒 言

秋田県能代市では、1983年5月26日の日本海中部地震により、津波による多数の死者の他に、家屋の倒壊・道路欠損など著しい被害を受けた。被害の多くは液状化を主とする地盤災害によるものであり、今後の地震動災害の予防には、いまだ明確にされていない地盤振動特性と地盤災害との関連について調査研究を進めることが必要と考えられる。

微動研究グループでは1984年8月能代市域で短周期微動・ボーリング・PS検層・表層S波速度・地下水水位等の総合的調査を行い、当地域の地盤振動特性を明らかにすると共に、地震時における地盤災害との関連について総合的な検討を行ってきた。このような微動に関連する諸調査も含めた大規模な調査研究は今回が初めてと思われる。これらの研究は既に各種関連学会で口頭発表され（微動研究グループ、1984、1985a、1985b、1985c、1985d、1985e、1985f、1986a、1986b、1986c、1986d、1986e；阿部司他、1986）評価を受けているが、本報告においてはそれらのうち、短周期微動の振幅・スペクトル等と微地形・地質および地盤災害との関係について検討した結果を報告する。

2. 調査区域

2.1 地形および地質

Fig. 1 に能代市の位置を示す。Table 1 に能代市およびその周辺での第四系の層序を、Fig. 2 に調査区域の地質図、Fig. 3 に微地形区分図を示す。調査区域内の地質および微地形の概要は以下のとおりである（1983年日本

Table 1 Stratigraphy of Noshiro City and its vicinity (after Research group of Akita University for ground failure caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake, 1984).

AGE		STRATIGRAPHY	
		Dune deposits	Alluvium deposits
Quaternary	Holocene	D-IIb	F-III
		D-IIa	
		D-Ib	F-II
	D-Ia	F-I	
Pleistocene		Post katanishi For.	
		Katanishi For.	
Tertiary	Pliocene	Sasaoka For.	

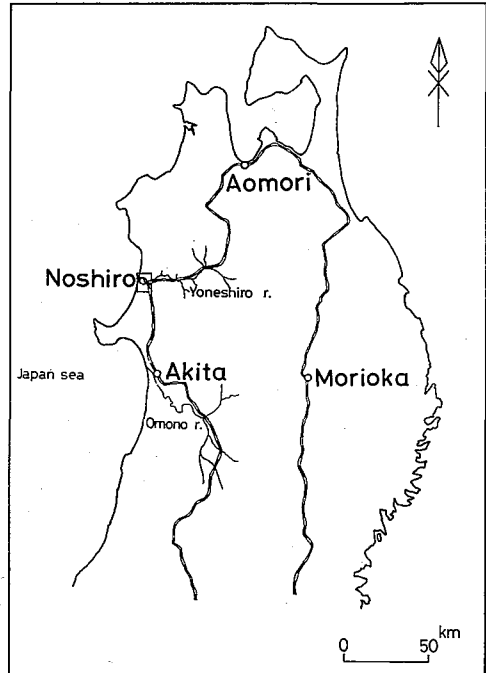


Fig. 1 Map showing the area of investigation.

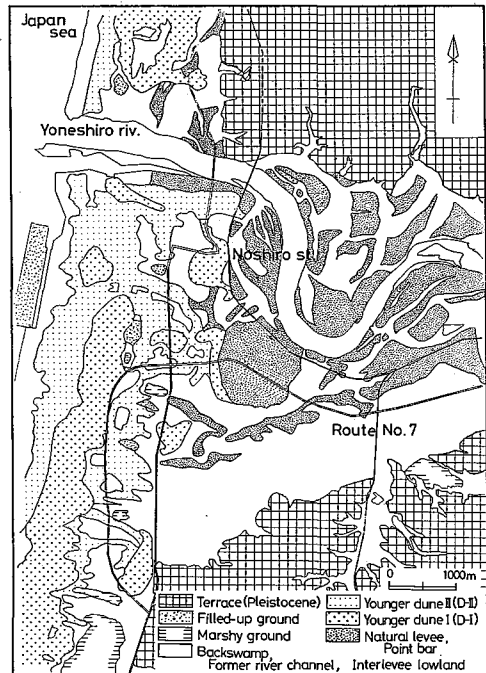


Fig. 2 Microtopographic map of Noshiro City (after Research group of Akita University for ground failure caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake, 1984).

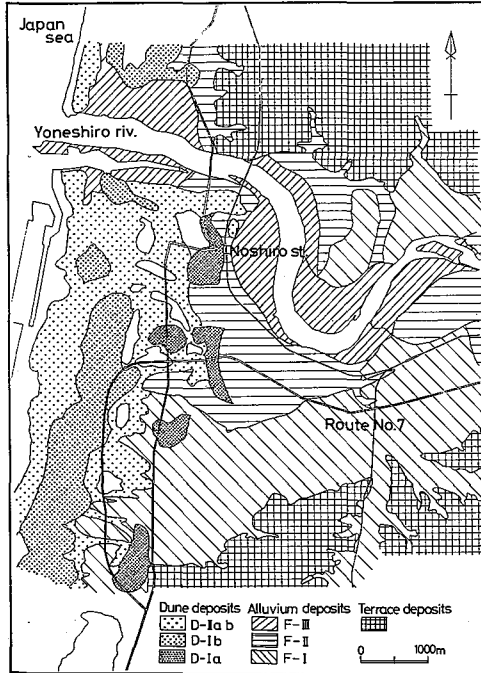


Fig. 3 Subsurface geological map of Noshiro City (after Research group of Akita University for ground failure caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake, 1984).

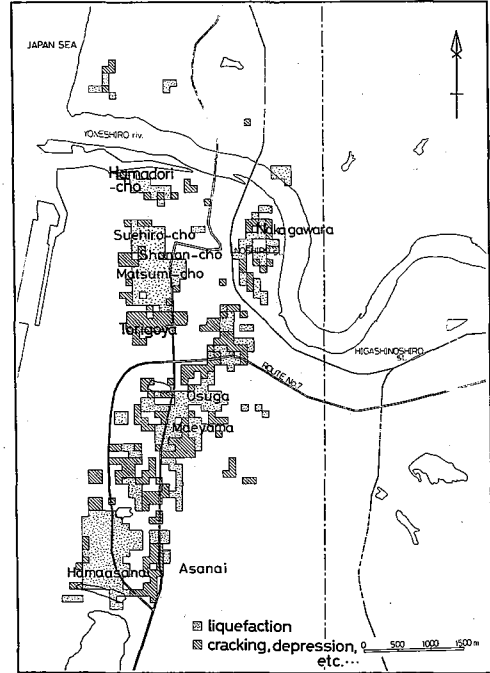


Fig. 4 Ground failure caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake. Stippled parts show liquefied areas, and another ground failure are found in shaded areas.

海中部地震災害秋田大学地質調査班, 1984)。

調査区域に分布する地層は第三紀新世から第四紀更新世へかけての笹岡層を基盤として、下位から第四紀更新世の砂および礫を主として泥および泥炭を伴う瀉西層、泥・砂・礫を主とする段丘堆積物、沖積平野堆積物および砂丘堆積物である。

調査区域の地形は、更新世段丘・沖積平野・砂丘と大きく3つに区分される。更新世段丘は面高度40~60mの瀉西層によって構成される段丘と、面高度20~40mの瀉西層後に形成された段丘を含む。これらの段丘を東西に開析して米代川の幅広い河谷が発達し、谷底沖積平野が開けている。更新世段丘の西縁はほぼ南北の急崖をなして、その西側の比較的幅のせまい海岸平野に接している。能代市街地はこの海岸平野と谷底平野にまたがって発達している。海岸平野部には海岸線に沿って砂丘がよく発達しているために平坦地はせまい。

沖積平野にはわずかな比高であるが、高い方からF-I・F-II・F-IIIの3つの地形面が認められる。F-I面は高度8~9mの平坦面である。F-II面は高度4~6mの起伏の著しい面であり、F-Iを切って分布している。また、

F-IIIは高度4m以下で現在の米代川に沿う最も低い面である。沖積層の主体をなすのは、主として約6000年前の縄文海浸時に形成された最も古いF-I層で、F-III層は最も新しく米代川が現在の流路をとるようになってから堆積したものである。

このように平野面自体が3段に段化しているが、さらに比高数メートル以下の河成微地形が区分される。蛇行流路の微地形は自然堤防(砂・シルト)、ポイントバー(砂・砂礫)の微高地と旧河道(泥・粘土)、後背湿地(泥・粘土・泥炭)の凹地・低平地からなっている。

また、能代沖積平野の海岸部には、各沖積面の上のって、あるいは指交して大規模な砂丘が発達している。この砂丘は北方の八森町から南方の男鹿半島に至る長大な砂丘の一部で、当地域では1.5~2kmの幅で海岸線を縁どっており、頂面高度は40~50mである。砂丘は、砂丘地形の本体をなす新砂丘I(古い方からD-Ia, D-Ib)とこれよりも新しい新砂丘II(同じくD-IIa, D-IIb)に区分される。新砂丘IIは新砂丘Iより高度が低く新砂丘Iより海岸線側に分布するとともに、一部は内陸側に達し、しばしば縦列砂丘の形態を有する。

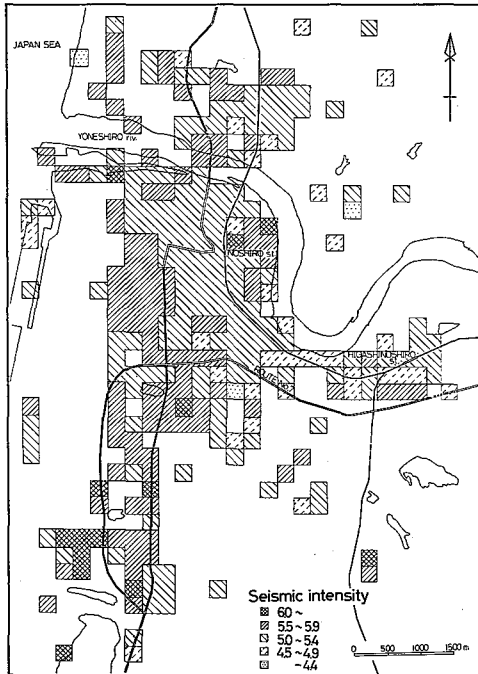


Fig. 5 Distribution of detailed seismic intensities by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake (after Nogoshi, 1984).

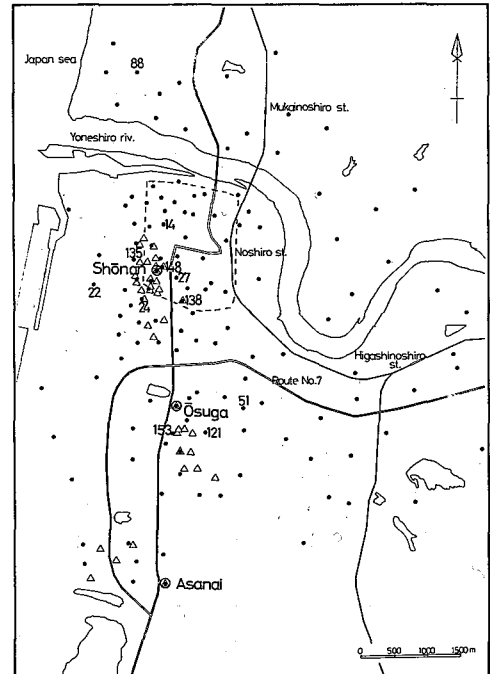


Fig. 6 Map showing the sites where microtremors were observed (solid circles), S wave velocities were measured (open triangles), and well velocity surveys for P- and S-waves were made (open circles). The area enclosed by the dashed line is urban district area.

2.2 日本海中部地震（1983年）による地盤災害

1983年日本海中部地震により、能代市では全壊683棟、半壊1596棟の建築物の被害の他道路・上水道・下水道・農工業関係その他に著しい被害を受けた。地震後の各種調査機関の詳細な調査により、これらの被害の多くは地盤の液状化による噴砂・噴水・陥没の他地盤の変位による亀裂・滑落等によったことが明らかにされている（1983年日本海中部地震災害秋田大学地質調査班，1984；秋田県総合地震対策研究会，1984；中央開発株式会社，1983；能代市，1984；(株)応用地質調査事務所，1984）。

Fig. 4に秋田大学地質調査班による調査結果（1983年日本海中部地震災害秋田大学地質調査班，1984）に基づく地盤災害の著しい区域を示す。図には亀裂・水平移動・陥没・膨れ上りなどの現象が見い出された区域，ならびに噴砂・噴水等地盤の液状化が見い出された区域を100mメッシュで示した。なお、一点鎖線より東側区域では詳細な資料が見い出せないため、地盤災害の有無については図に示していない。

能代市における地盤災害は概観して2つの区域に大別される。1つは市中心部より西側の昭南町・松美町・末

広町を中心とする南北約2.5 km・東西約600mの範囲で、特に地盤災害の集中した松美町・昭南町では、東西500m・南北250mの範囲にわたっておびただしい噴砂を伴ない、町内のすべての道路が波状変形をうけた。もう1つは市街地東側の米代川に隣接する中川原から南南西の方向に向い、前山を経て南限を浜浅内地区とする南北約6 km・東西800~1300mの範囲である。これらの区域は砂丘が主として砂丘間低地・後背湿地・旧河道など沖積平野に移行する部分に位置している。これに対し砂堆上に発展した旧市街地や自然堤防では比較被害が少ない傾向が見い出される。

Fig. 5にアンケート方式による高密度震度分布（野越三雄，1984）を250mメッシュで示す。調査結果は震度0.1単位で表示されているが、図では全体の傾向を把握しやすいように0.5ごとに区分したものである。能代市域での平均震度は5.3と秋田県内の他地域に比して大きい。また、特に震度が大きい5.5以上の区域は前述の地盤災害の著しい区域とかなり対応して分布している。

2.3 測点位置

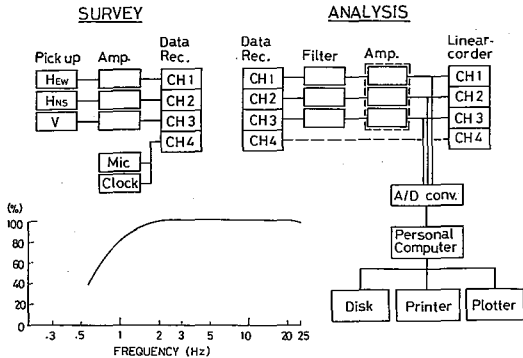


Fig. 7 Block diagram of measurement and analysis systems. Overall frequency characteristics are flat between 1.0 and 25 Hz.

短周期微動・ボーリングおよび表層S波速度の測定を行った場所をFig. 6に示す。短周期微動の移動観測点は、1983年日本海中部地震で著しい被害を受けた能代市街地を中心に密に分布させ、それをとりまくように外側に疎に分布させた。また、前項でのべた地形および地質条件の異なる場所を網羅するように留意し、合計153地点で観測を行った。数字は後に微動のスペクトルを示す測点の番号である。測定区域は東西約6.5 km・南北約8 kmの範囲である。

ボーリングは地盤災害の著しい昭南町児童公園・大須賀公園と無被害地の浅内小学校校庭の3ヶ所で行った。深度はいずれも20mで、PS検層を行った。表層S波速度は板たつき震源により、地盤災害が著しい昭南町・前山地区を中心に行った。

3. 短周期微動の測定・解析装置および方法

測定および解析システムのブロックダイアグラムおよび系の総合周波数特性をFig. 7に示す。測定に用いた地震計は固有周期1秒の動電速度型3成分で、増幅器により100~2000倍に増幅し、データレコーダに記録した。移動観測の効率をあげるため、3成分1点観測を1班としてA・B・Cの計3班が測定にあたった。3班での測定器材は若干異っているが、同一地点・同一時刻での3班の測定記録を解析することにより、3班の3成分とも殆んど同じ特性を示すことを確認している。

測定を行ったのは1983年8月1日から8日までで、雨・風等の気象条件に留意し、車の通行等特定振動源からのノイズの少ない午前0時~4時の間に行った。1測点の測定時間は正味5~6分間を基準としたが、深夜でも長時間にわたって人車の通行がとぎれない市街地では20

分程度記録した測点もある。

解析に際しては、データレコーダの記録をリニアコーダに再生し、波形を十分に吟味・検討の上、極短周期な振動(直接的な人工ノイズ)等がみられる部分を除外し、約1分間の解析区間を選定した。この区間を長さ3秒ごとに区分し、各区分内の最大振幅を読み取り、それら20個の算術平均を平均最大振幅とした。また、平均最大振幅を読みとった解析区間のうちの40.96秒について0.02秒間隔でデジタル化し、FFTにより周波数解析を行った。一般には1ヶ所の測定記録において複数の解析区間を選定しうるが、平均最大振幅については、解析区間ごとの差異は、後述する平均最大振幅分布に差異を生じる程大きくはないことから、通常は1つの区間の値をもって代表させた。スペクトルについては、できるだけ多数の解析区間ごとの記録を平均することがより望ましいと考えられるが、ここでは複数の解析区間でのスペクトルの型が類似している場合には、平均最大振幅を読みとった区間のスペクトルをもって代表させ、一方、解析区間により明らかに差異が認められる場合にはデータとして採用しないこととして以後の検討を行った。測定・再生系の総合周波数特性は、1 Hzから25 Hzまではほぼフラットである。

なお、1983年日本海中部地震による能代市域の地盤災害が主として液化化によるものであり、地盤災害は地表下ごく浅所の地下構造に密接に関連するものと予測されることから、微動観測においても短周期(高周波)成分が目目される。この比較的高周波の成分は副次的成分として含まれることが多いため、スペクトルにおいてこれらの成分が見い出されやすいように、フーリエ振幅(複素フーリエ級数の実数部と虚数部の2乗和の平方根×解析時間×1/2)を求めた。そして、Hanningのウィンドウを3回かけることにより平滑化し、最大ピークで正規化した1~10 Hzの範囲でのフーリエ振幅スペクトルとして表示した。

4. 解析結果および考察

4.1 微動の時間的安定性

微動の時間的領域での変動を調べるため、2ヶ所で移動観測の時間帯である23時から4時30分にかけて、振幅およびスペクトルの変化について検討した。測定を行ったのは、市街地で地盤災害が著しかった昭南町児童公園と郊外で段丘上に位置し無被害地の浅内小学校校庭である。両地点での平均最大振幅の時間的変化をFig. 8に示す。図から明らかなように浅内における平均最大振幅はほぼ一定の値を示している。一方、昭南町児童公園で

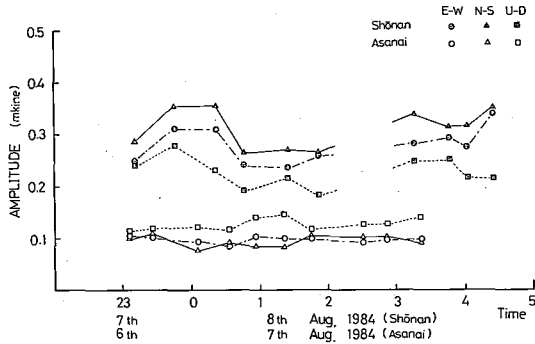


Fig. 8 Variation of amplitude of short-period microtremors with time at the Shonan-cho park and the ground of Asanai elementary school. E-W and N-S; horizontal component, U-D; vertical component.

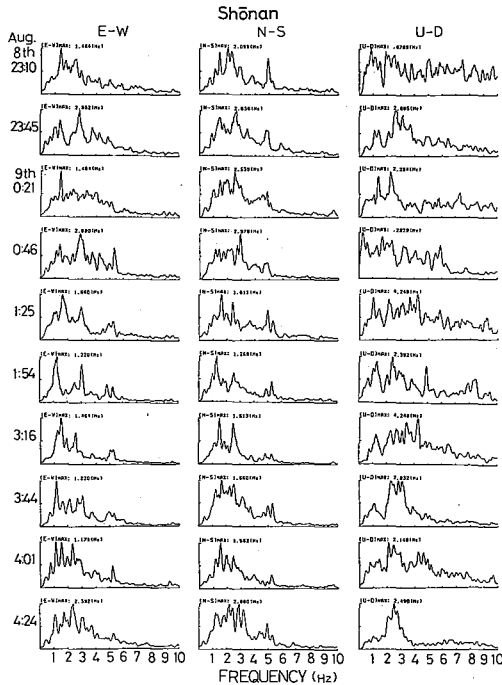


Fig. 9 Variation of spectral characteristics of short-period microtremors with time at the Shonan-cho park.

は 0 時前後および早朝にやや大きくなる傾向があるものの、深夜における平均最大振幅の変化は 10% 以下と小さい。両測点における平均最大振幅の時間変化を比較すると、昭南町児童公園では浅内小学校の 2 倍以上平均最大振幅が大きい。その原因は明瞭ではないが、人口密集地で交通機関等の人工的騒乱が大きいことおよび地盤特性

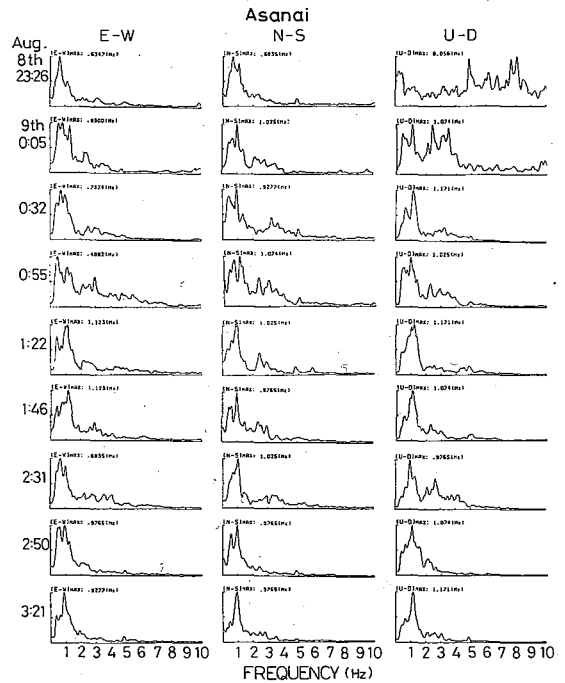


Fig. 10 Variation of spectral characteristics of short-period microtremors with time at the ground of Asanai elementary school.

のいづれにも関連していると考えられる。

Fig. 9 に昭南町児童公園におけるスペクトルの 23 時～4 時 30 分頃における時間的変化を、同様に Fig. 10 に浅内小学校校庭における結果を示す。郊外に位置する浅内小学校におけるスペクトルは、23 時 26 分および 0 時 05 分の上下動成分でそれ以降の時間帯と型が異なっているが、0 時 32 分以降は 1 Hz 程度に単一のピークを有するスペクトルを示し、よく安定している。一方、昭南町児童公園においては、市街地で人工的騒乱等が大きいことからスペクトルの型は浅内小学校ほど安定していない。しかし、交通機関等の影響がごく少ない 1 時 25 分～3 時 16 分には、ピークの相対的な大きさに変動が認められるものの、後述するスペクトルタイプとの観点からすると一定とみなすことができる。すなわち、昭南町児童公園では 1 時 30 分～3 時 30 分頃、浅内小学校では 0 時～4 時頃における微動の平均最大振幅およびスペクトルはほぼ一定とみなされる。

能代市域の他の測点でも同様のことが期待されるので、測定場所と測定時刻とに十分留意すれば、深夜の移動観測で得られた各々の測点での平均最大振幅およびスペクトルについては、測定日・時刻が異なっても相

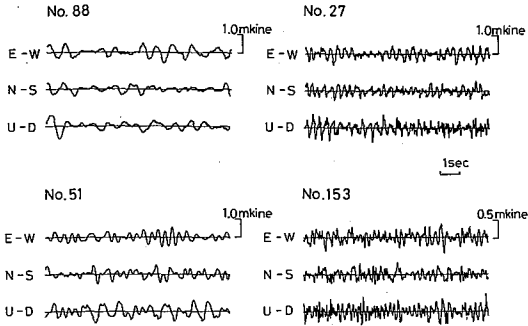


Fig. 11 Examples of wave forms of short-period microtremors recorded in Noshiro City. No. 88, No. 51, No. 27 and No. 153 are observation sites shown in Fig. 6.

互に比較・検討してさしつかえないものと考えられる。

4.2 速度振幅およびスペクトルタイプの分布

能代市域で観測された微動の波形の例を Fig. 11 に示す。平均最大振幅は水平動成分で0.05~1 m Kine, 上下動成分で0.05~0.8 m Kine の範囲にあり, 一般には上下動成分に比して水平動成分がやや大きな値を示している。NS 成分と EW 成分とを比較すると水平動2成分では多くの測点で平均最大振幅はほぼ等しい値を示しているため, 代表例として Fig. 12 に EW 成分の平均最大振幅分布図を示す。市街地から南西にむかって0.4 m Kine 以上の平均最大振幅の大きな区域が分布し, それ

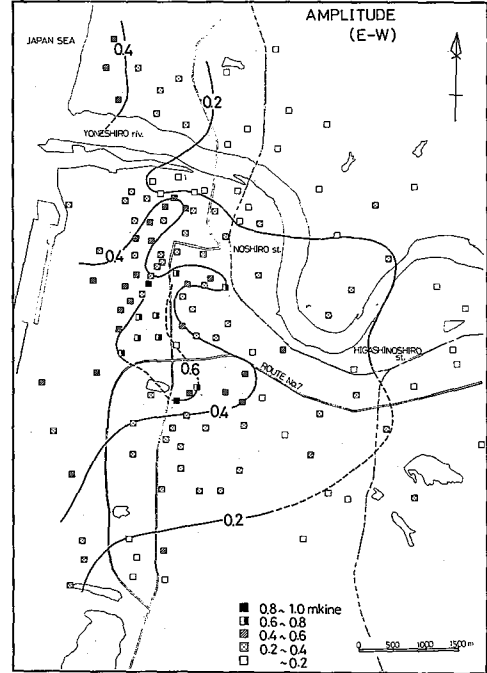


Fig. 12 Contours of amplitude of short-period microtremors in Noshiro City (E-W component).

をとりまく形で0.2~0.4 m Kine のやや振幅の大きな区域が分布する。一方, 測定区域東端および段丘の分布す

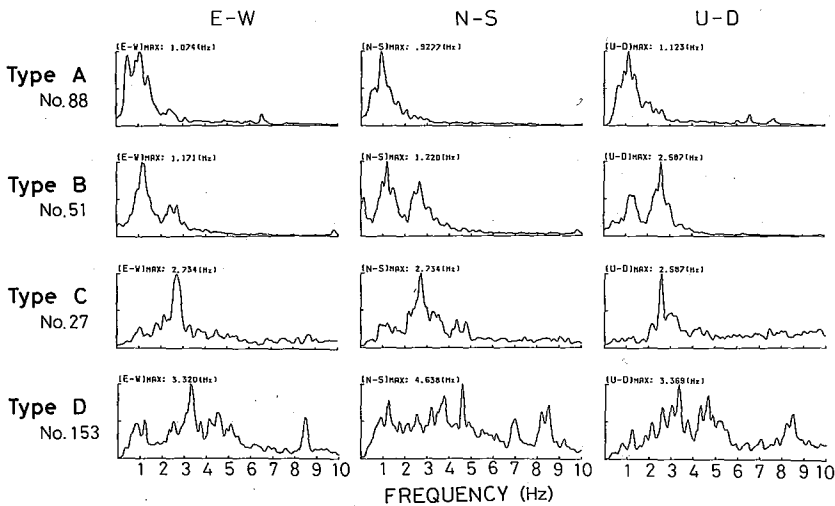


Fig. 13 Classification of spectral pattern of short-period microtremors. Type A has a single peak below 1.5 Hz, type B has a single peak below 1.5 Hz and from 2.0 to 3.0 Hz, type C has a peak from 2.0 to 3.0 Hz, and type D has some peaks from 1.0 to 10 Hz.

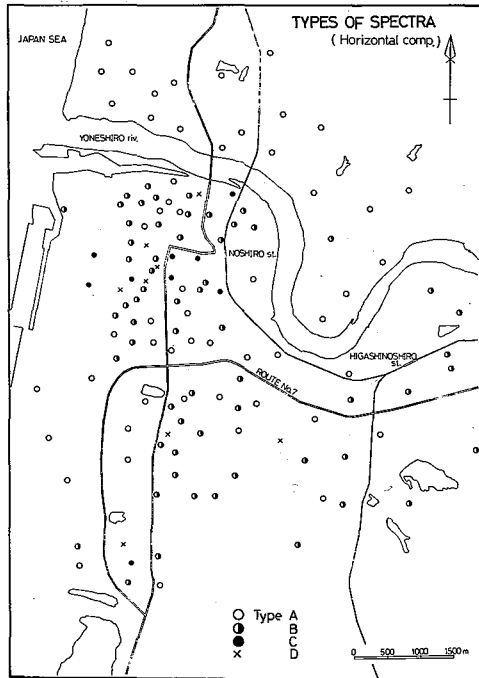


Fig. 14 Distribution of spectral pattern of short-period microtremors in Noshiro City (type A, B, C and D). Spectral types shown in the figure indicate features of spectra obtained for horizontal component of microtremors.

る北部・南部では一般に振幅が著しく小さい。

解析の結果得られたフーリエスペクトルには種々のパターンが見出されるが、メインピークおよびその1/2以上のフーリエ振幅を有するピークに着目して、これらを Fig. 13 に代表例を示すような4つのタイプに大別する。すなわち、タイプAは1.5 Hz以下に単一のピークを有するもの、タイプCは2~3 Hzに単一のピークを有するもの、タイプBは1.5 Hz以下と2~3 Hzに2つのピークを有するもの、タイプDは多くのピークを有するものである。水平動2成分のスペクトルタイプはほとんどすべての測点で同じタイプに属する。また、多くの測点ではこれら水平動成分のスペクトルタイプと上下動成分のスペクトルタイプは同じである。なお、ここに掲げたスペクトルの例は Fig. 11 に示した観測波形に対応している。Fig. 14 に水平動成分のスペクトルタイプの分布を示すが、能代駅から市街地にかけてタイプBおよびCが多く分布し、タイプAは郊外に多く分布する傾向が認められる。

また、上に示した4つのスペクトルタイプの区分に着目したピークとは別に、4 Hz以上の比較的高周波に明瞭なピークを有するスペクトルがあり、これらをタイプaとする。後述するように、このタイプは液状化災害の著しい区域に多く見出される。4 Hz以上にピークが見出されないものをタイプbとすると前述のA・B・

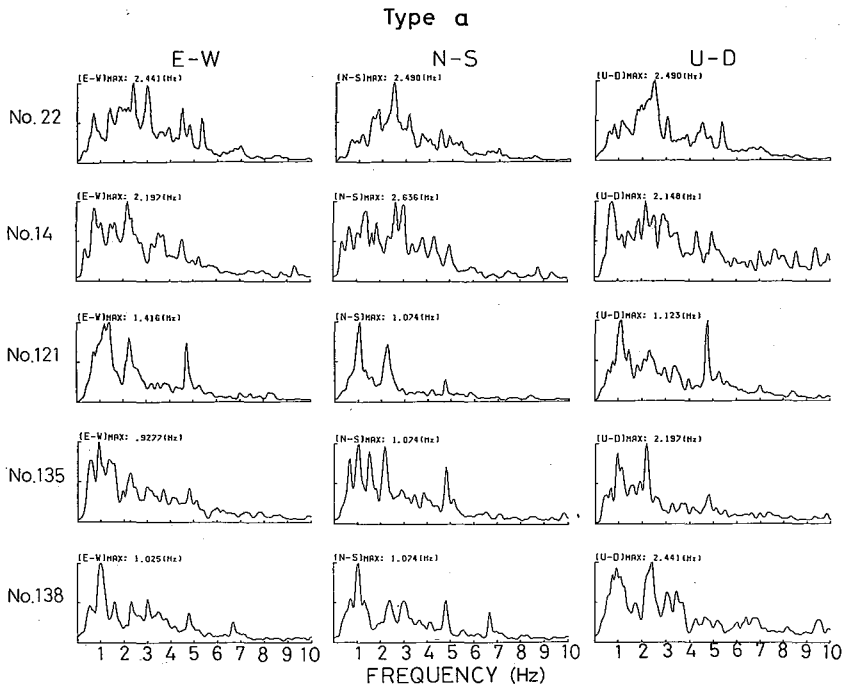


Fig. 15 Examples of spectrum type a, with some peaks above 4 Hz in the spectra.

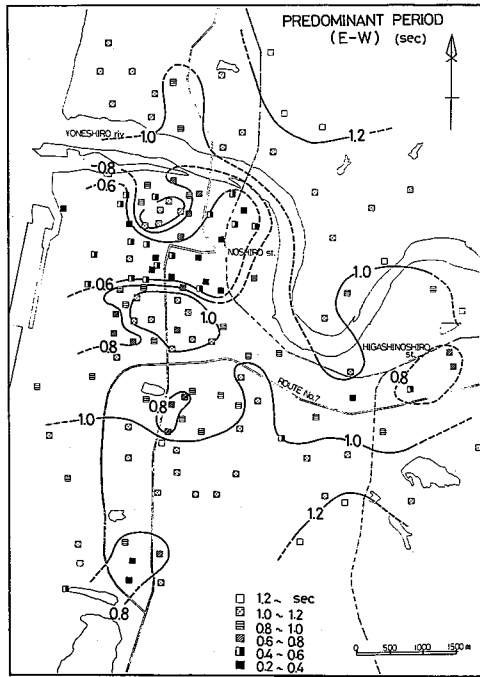


Fig. 16 Distribution of predominant period of short-period microtremors in Noshiro City (E-W component).

C・Dの4タイプとは別の分類として、スペクトルをaおよびbの2つのタイプに大別できる。Fig. 15にスペクトルタイプのaの例を示す。

フーリエスペクトルにおいて最も大きなピークを示す波の周期を卓越周期としてその分布をFig. 16に示す。当地域における卓越周期は水平動成分で0.2~1.6秒、上下動成分で0.2~1.3秒である。卓越周期も各成分で著しい差異はないので、図には代表としてEW成分の値を示した。能代駅から市街地にかけて0.6秒以下の短周期成分が卓越し、平均最大振幅分布ほどコンターがシンプルではないが、その区域の外側に1秒以上の比較的長周期成分が卓越する区域が広がっている。

4.3 地形・地質と微動特性との関係

平均最大振幅・スペクトルタイプとFig. 2およびFig. 3に示された微地形・地質との関係についてヒストグラムを作成し検討を行った。Fig. 17に各微地形ごとの平均最大振幅およびスペクトルタイプのヒストグラムを示す。水平動成分の平均最大振幅はEWおよびNS成分の平均値である。また、ほとんどすべての測点でスペクトルタイプはEWおよびNS成分で同一なので、EW成分の頻度を水平動成分として示した。

水平動および上下動成分とも沖積平野をとりまく段丘

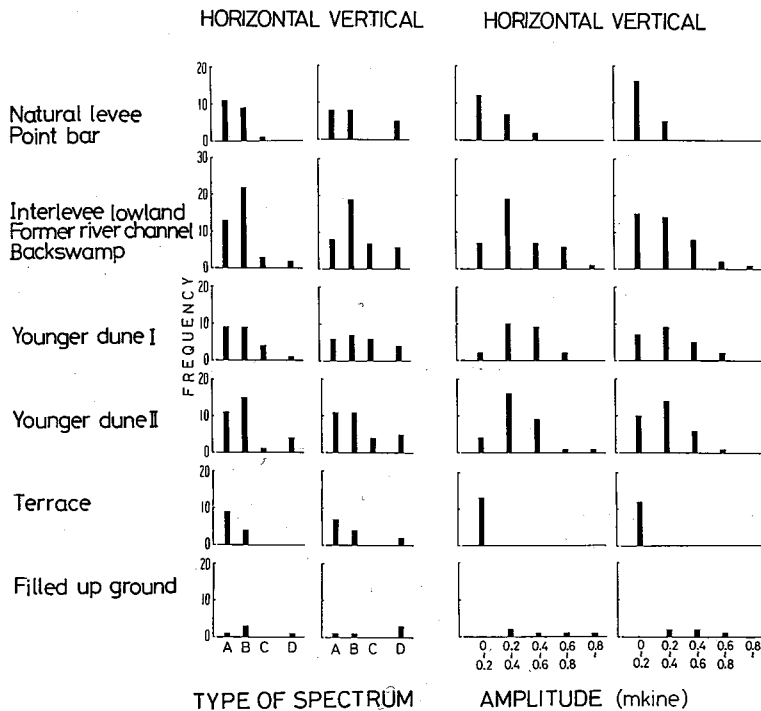


Fig. 17 Frequency distributions of spectral types and average amplitude versus microtopography. Average amplitudes of microtremors particularly small at terrace. Type A of microtremor spectra is shown mostly at terrace.

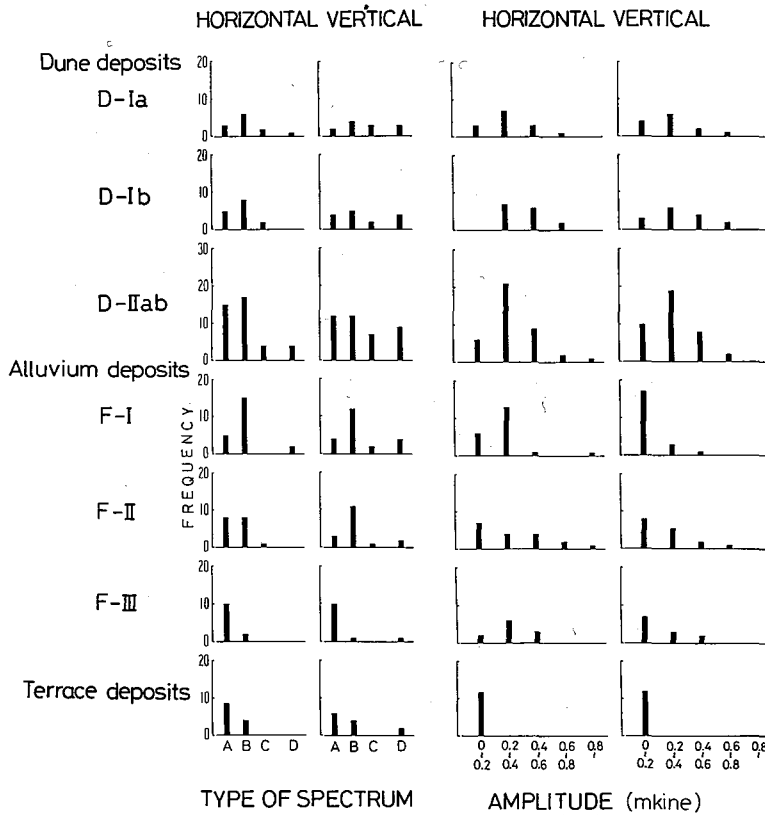


Fig. 18 Frequency distributions of spectral types and average amplitude versus subsurface geology.

では平均最大振幅が小さく、かつ、スペクトルタイプも相対的にAが多い。その他、砂丘・砂丘間低地・旧河道・後背湿地・自然堤防・ポイントバーと比較すると、微高地である自然堤防およびポイントバーでやや振幅が小さく、スペクトルタイプは相対的にAがやや多い。

Fig. 18に地質区分ごとの平均最大振幅およびスペクトルタイプのヒストグラムを示す。微地形の場合と同様に、段丘堆積物が分布する区域では平均最大振幅が小さく、かつ、スペクトルタイプはAの割合が多い。また、沖積層が分布する区域では、FIII→F-Iと堆積した時代が古くなる程タイプBが相対的に多くなる。

4.4 日本海中部地震による地盤災害と微動特性との関係

地震時における地盤の振動性状はその地盤の振動特性を反映するはずである。したがって、このたびの1983年日本海中部地震による地盤災害も地盤の振動特性と密接な関係があると考えられる。Fig. 19に高密度震度およびスペクトルタイプ(A・B・C・D)の分布を、またFig. 20に震度ごとのスペクトルタイプのヒストグラム

を示す。微動の測点数の少ない震度6以上を除くと、水平動および上下動成分とも震度が大きくなるに従いスペクトルタイプAの割合がやや減少し、タイプDの割合がやや増加する傾向が認められる。同様にタイプaおよびbの区分に着目すると、震度が大きくなるに従いタイプaの割合が増加する傾向が認められるものの、これらの傾向は顕著なものではない。震度の中には、地震動の強さ・揺れの度合・建築物の被害状況等さまざまな要素が絡みあっているため、他の測定量との間に明瞭な関係が見出し難いとも考えられるので、本稿においては、能代市域における地盤災害の主たる要因である液状化災害に着目し、液状化災害と地盤の振動特性との関係について検討することとした。

能代市域で当研究グループがボーリング・PS検層および地表S波探査により測定した表層S波速度*は大部分が80~160 m/sである。ボーリング・PS検層を行っ

* 地表下第1層のS波速度をさす。但し、1m以浅に整地等による高速度層あるいは盛土等による低速度が認められる場合にはこれらを除外した。

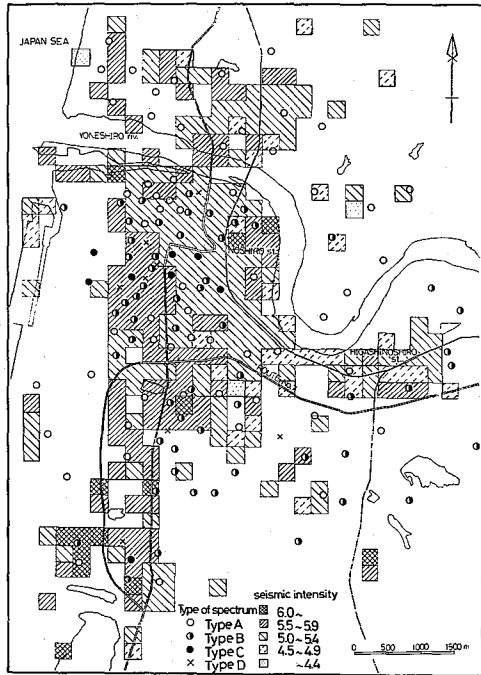


Fig. 19 Distribution of detailed seismic intensities and spectral types of short-period microtremors (type A, B, C and D) in Noshiro City. Spectral types shown in the figure indicate features of spectra obtained for horizontal component of microtremors.

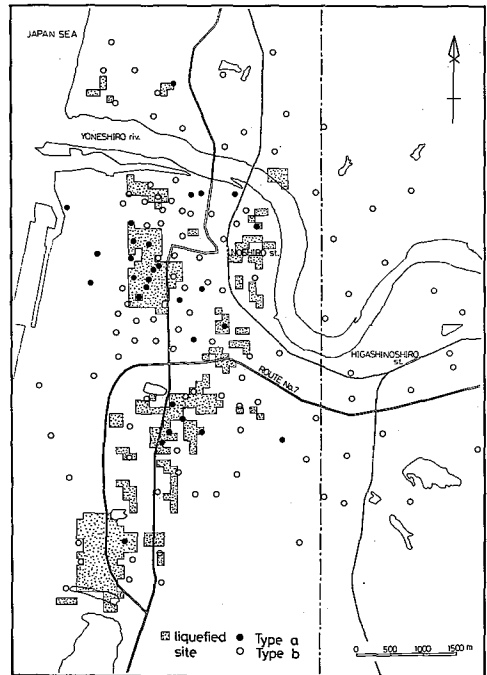


Fig. 21 Distribution of spectral types (type A, B, C and D) and liquefied areas caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake. Stippled parts show liquefied areas. Spectral types shown in the figure indicate features of spectra obtained for horizontal component of microtremors.

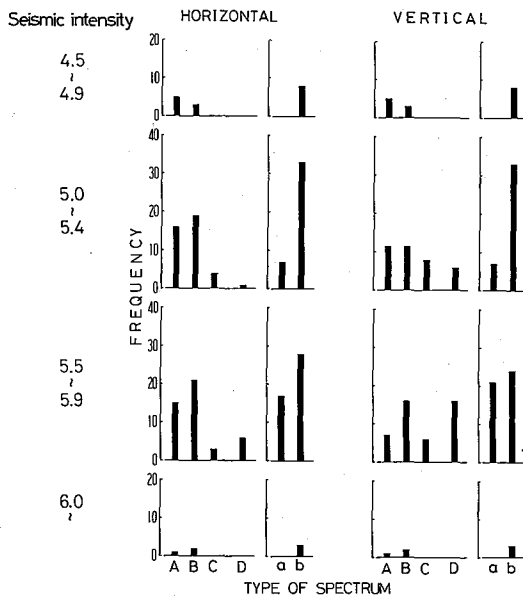


Fig. 20 Frequency distributions of spectral types versus seismic intensities.

た3地点のうち、浅内小学校では表層S波速度が160 m/sと大きく地下水位も10mと深い、このような場所に代表されるように表層S波速度が大きい場所では液状化が生じていない。一方、能代市域の多くの場所では表層S波速度は130 m/s以下と小さな値を示している。能代市域に分布する砂質土は平均的な粒径をあらわす中央粒径 U_{50} が0.30~0.48であり、粒径加算曲線からもきわめて液状化を生じやすい砂とみなされる(微動研究グループ, 1985e, 1987)。しかし、表層S波速度の小さな区域でも液状化を生じている場合と生じていない場合とがあり、液状化は表層S波速度の他に地盤の振動特性にも関係するものと予測される。

スペクトルタイプ(A・B・C・D)および液状化を生じた区域(100mメッシュ)の分布をFig. 21に、スペクトルタイプ(a・b)および液状化を生じた区域(100mメッシュ)の分布をFig. 22に示す。また、液状化および非液状化区域で見いだされるスペクトルタイプのヒストグラムをFig. 23に示す。

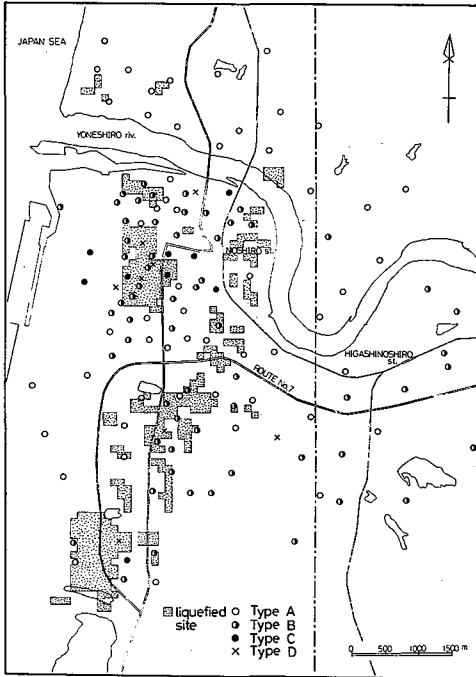


Fig. 22 Distribution of spectral types (type a and b) and liquefied areas caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake. Stippled parts show liquefied areas. Spectral types shown in the figure indicate features of spectra obtained for horizontal component of microtremors.

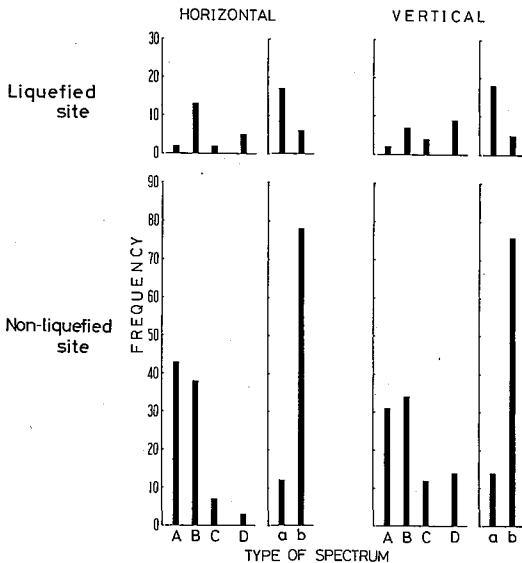


Fig. 23 Frequency distributions of spectral types versus liquefied site and non-liquefied sites. Type a of microtremor spectra is mostly found at liquefied areas.

液状化および非液状化区域で微動の測点総数が異なっているが、両区域ごとのスペクトルタイプの頻度分布には以下のような傾向が認められる。A・B・C・Dのタイプ区分でみると、水平動および上下動成分とも非液状化区域ではタイプAおよびBがほぼ等しく、かつタイプCおよびDと比較すると2倍以上と多い。これに対し、液状化区域では水平動成分はタイプBが最も多く次いでタイプDが多く、上下動成分ではタイプDが最も多く次いでタイプBが多い。すなわち、液状化区域では非液状化区域に比してタイプAの割合が小さく、逆にタイプDの割合が大きい。一方、a・bのタイプ区分でみると、水平動および上下動成分とも非液状化区域ではタイプaはタイプbの1/6以下と著しくわずかであるのに対し、液状化区域ではタイプaはタイプbの3倍以上と多い。すなわち、液状化および非液状化区域でのスペクトルタイプの頻度の差異はA・B・C・Dのタイプ区分よりa・bタイプ区分でみるとその差異がより明瞭であり、液状化はスペクトルのピークが4 Hz以上の比較的高周波にも見出される区域で多く発生している。

スペクトルタイプA・B・C・Dの区分におけるタイプDの多くは4 Hz以上の比較的高周波にも明瞭なピークを有しており、a・bのスペクトルタイプの区分ではaに分類されるものが多いため、非液状化区域に比して液状化区域でタイプDの割合が多いことと同じくタイプaの割合が多いことは調和的である。しかし、タイプA・B・Cの多くはbに分類されるものの、タイプaに分類されるものも含まれるため、A・B・C・Dのタイプ区分はa・bのタイプ区分より液状化との関係が明瞭でないものと考えられる。

一般に、S波速度の小さな表層の下に速度の大きな層の存在する二層構造すなわち速度コントラストが大きい境界では、いわゆる1/4波長則が近似的に成立することが知られており、表層のS波速度と層厚が既知ならば次式により卓越周波数を求めることができる。また逆に表層のS波速度が知られば卓越周波数から層厚を推定することも可能である(野越他, 1979)。

$$\frac{V_{S1}}{f} = 4 H_1$$

ここで V_{S1} は第1層のS波速度、 H_1 は第1層の層厚、 f は卓越周波数である。

そこで、4 Hz以上の比較的高周波のピークが地表下どの程度の深さの地盤構造と関連するかについて、1/4波長則を適用することによりボーリング・PS検層および表層S波探査の結果と対比・検討した。

Fig. 24 に液状化区域の昭南町児童公園におけるボー

Shōnan

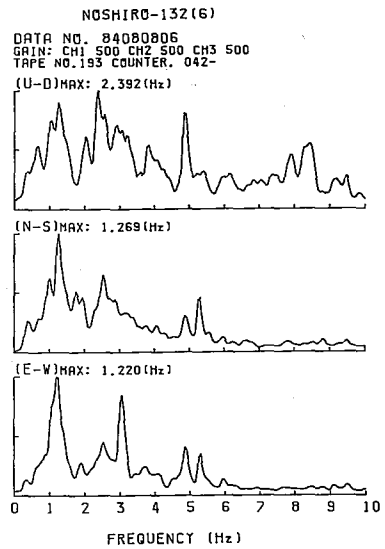
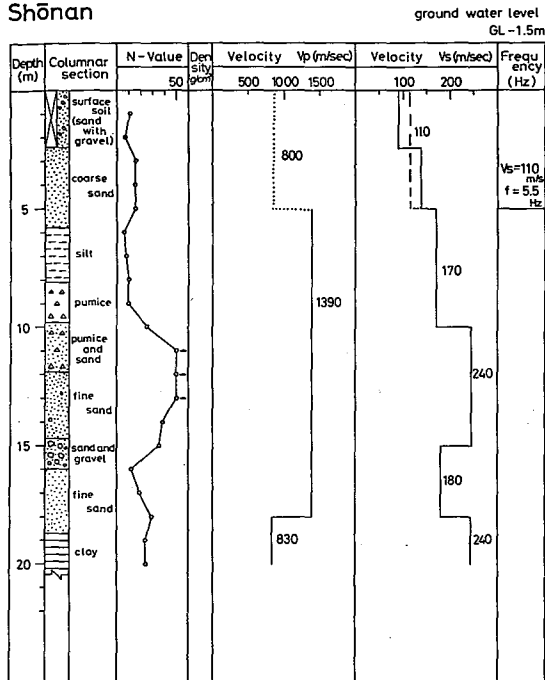


Fig. 24 Spectra of short-period microtremors and physical factors of underground structure at the Shōnan-cho park. P- and S-wave velocities were measured by sonic log. A frequency corresponding to the law of quarter wave-length (S wave velocity of upper layer is 110 m/s, and bed thickness is 5 m), can be found in the spectrum of short-period microtremors.

Ōsuga

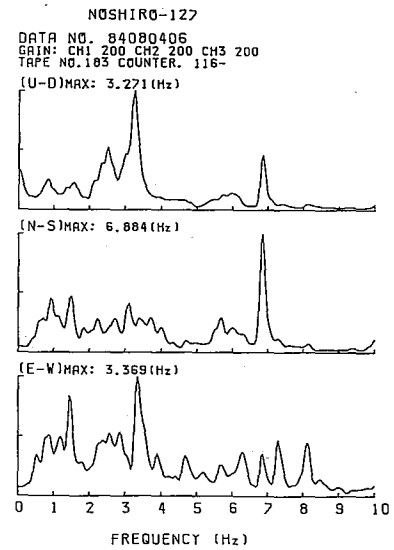
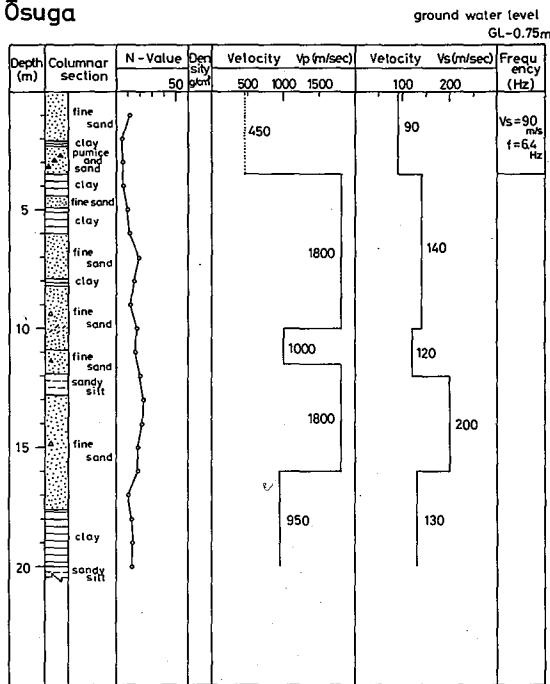


Fig. 25 Spectra of short-period microtremors and physical factors of underground structure at the Ōsuga park.

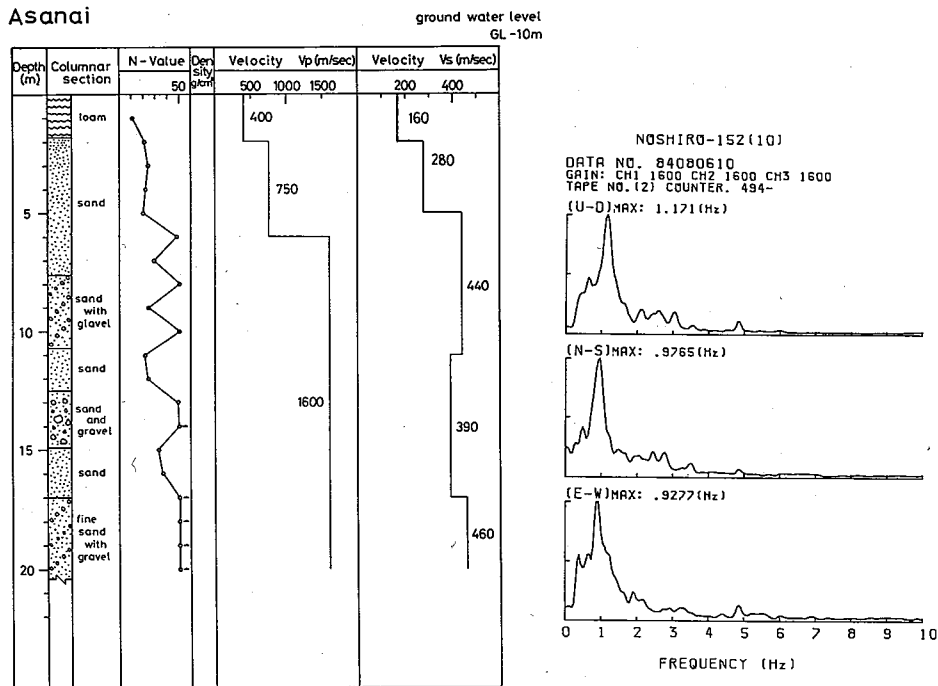


Fig. 26 Spectra of short-period microtremors and physical factors of underground structure at the ground of Asanai elementary school.

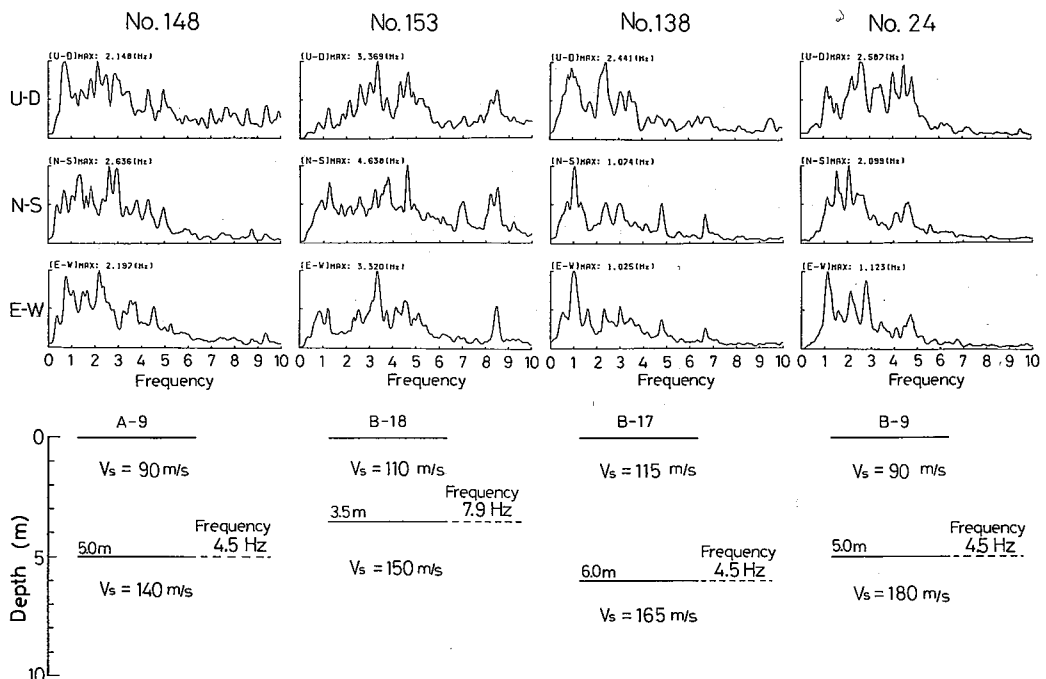


Fig. 27 Comparison between S-wave structures and spectra of short-period microtremors. S wave velocities were measured by the plank-hammering technique. A frequency corresponding to the law of quarter wave-length can be found in each spectrum of short-period microtremors.

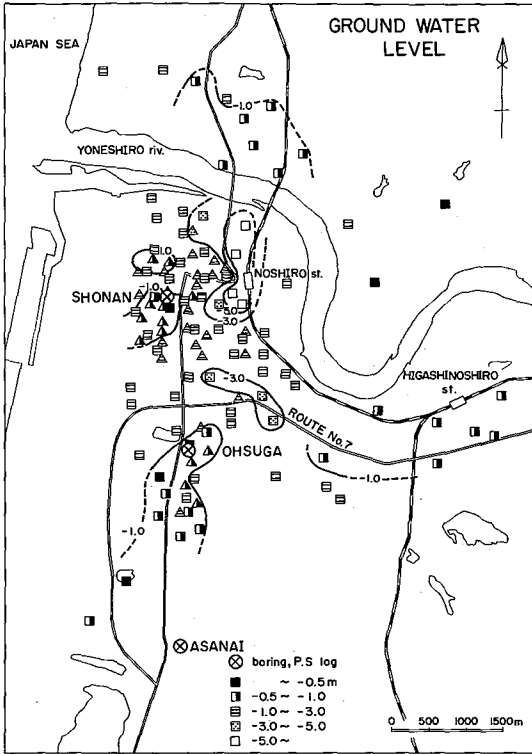


Fig. 28 Distribution of ground water level in Noshiro City. Triangles indicate the results of investigations by Noshiro city office, and squares those of questionnaire after the 1983 earthquake by the Noshiro city office.

リング・PS 検層の結果と微動のスペクトルとを対比して示す。上下動成分はタイプD、水平動成分はタイプBであるが、4 Hz 以上の比較的高周波に明瞭なピークを有する点からすると、いずれもタイプaと分類される。昭南町児童公園においては第1層および第2層の平均S波速度はそれぞれ110 m/s・170 m/sで、第1層の層厚5 mから1/4波長則により期待される周波数は5.5 Hzとなり、これに対応するピークがスペクトルに見出される。なお、図のPS 検層によるS波速度構造では、第1層(深度5 mまで)のS波速度が実線で示すように2層に区別されているが、地表S波探査の結果とも勘案し破線で示すように平均S波速度110 m/sとして検討したものである。

Fig. 25に液状化区域である大須賀公園におけるボーリング・PS 検層の結果とスペクトルとを対比して示す。水平および上下成分とも7 Hz付近に明瞭なピークを有し、タイプaと分類される。平均S波速度は第1層で90 m/s第2層で140 m/sと第1層の速度は能代市域

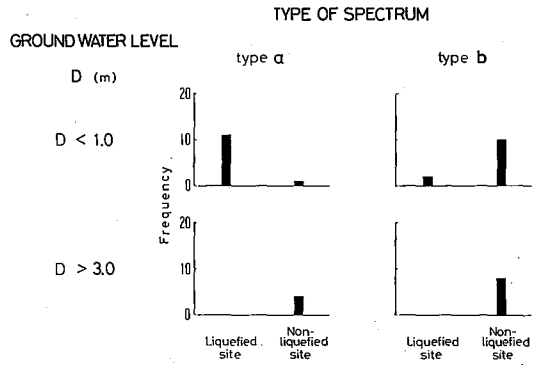


Fig. 29 Frequency distributions of liquefied and non-liquefied sites versus spectral types (type a and b) obtained for horizontal component of microtremors and ground water level. The liquefied sites show mostly ground water level within 1 m and type a of microtremor spectra.

の中でも特に低い値を示している。第1層の層厚3.5 mから1/4波長則で期待される周波数は6.4 Hzであり、これに対応するピークがスペクトルに見出される。なお、非液状化区域の浅内小学校校庭での表層S波速度はFig. 26に示すように160 m/sと大きく、地下水位も昭南および大須賀のそれぞれ1.5 mおよび0.75 mに比して10 m以深と著しく深く、被害地とは著しく地盤構造を異にしており、観測された微動のスペクトルもタイプAである。

地表S波探査の結果、いくつかの測点で地下浅所でS波速度を異にする2層構造が得られているので、速度構造と微動特性との関係について検討を行った。Fig. 27に検討結果の一部であるが、No. 148・153・138・24測点でのS波速度構造とその地盤上で観測された微動のスペクトルを対比して示す。いずれの測点も液状化被害の著しい区域であり、表層のS波速度は90~115 m/sと小さい。スペクトルはいずれもタイプa(タイプD)であり、1/4波長則からS波速度を異にする境界面に対応する微動の周波数は各々4.5 Hz, 7.9 Hz, 4.5 Hz, 4.5 Hzであるが、これらの周波数に近いピークが図のスペクトルに見出される。

いうまでもなく、スペクトルに見出される比較的高周波のピークがすべてS波速度の構造から説明しうるわけではない。また、地表S波探査から得られたS波速度構造の平面的な広がりには明らかではなく、1/4波長則をどの程度厳密に適用できるか否かはなお検討の余地がある。しかし、地表下10 m以浅にS波速度を異にする2層構造が見出されるほとんどの測点で、スペクトルの4

Hz 以上のピークの中に1/4波長則で説明しうるピークが含まれ、かつ液状化災害が生じている。このことは、地下のごく浅い所にS波速度を異にする境界面が存在する場合に、液状化災害が生じやすいことを示唆していると考えられる。

一方液状化は地下水位とも密接な関係があることが知られている。Fig. 28 に能代市域における地下水位分布を示す。図には地震直後に能代市が住民へのアンケート調査により求めた町内での平均地下水位（能代市、1984）、能代市が調査した結果などが示してある。アンケートの解答数が少なく、また、データに信頼性がうすいものを除外してプロットしたので分布はややあらい。しかし、液状化を生じた昭南町・大須賀付近では地下水位が1.0m以浅と浅くなっている様子がわかる。今回のボーリングでも昭南町児童公園で1.5m、大須賀公園で0.75mの結果が得られており、図は能代市域での概略的な地下水位分布をあらわしていると考えられる。そこで地下水位を1m以浅と3m以深とに区分して、スペクトルタイプa・bごとの液状化および非液状化区域のヒストグラムをFig. 29に示す。地下水位が3m以深ではスペクトルタイプにかかわらず液状化は生じていない。これに対し地下水位が1m以浅の場合、スペクトルbでは大部分で液状化を生じていないのに対し、タイプaではほとんどの場所で液状化を生じている。すなわち、能代市域においては、液状化は浅い地下水位に関係するばかりでなく、微動特性にも密接な関係がある。したがって、液状化災害の予測には微動観測も有力な手段の一つとして期待しうる。

5. 結 言

1984年8月に秋田県能代市域において、短周期微動・ボーリング・PS検層・表層S波速度・地下水位等の総合的調査を行ったが、本報告では主として微動の振幅・スペクトルと微地形・地質及び日本海中部地震による地盤災害との関係について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 平均最大振幅は能代市街から海岸方向にかけて大きく、内陸部に向って振幅の小さな区域が広がっている。
- 2) 当地域で観測された微動のスペクトルは、周波数1~10 Hzの範囲で、1.5 Hz以下に単一ピークを有するタイプA、2~3 Hzに単一ピークを有するタイプC、1.5 Hz以下と2~3 Hzに2つのピークを有するタイプB、1~10 Hzに多くのピークを有するタイプDの4分類の他、4 Hz以上の比較的高周波に明瞭なピークを有

するタイプa及びピークが認められないタイプbに大別できる。

3) 振幅は段丘で0.2 m Kine以下と特に小さく、ポイントバー・自然堤防の微高地では砂丘・砂丘間低地・後背湿地等に比してやや小さい。スペクトルタイプについては段丘でタイプAの割合が多く、沖積層については古い程タイプBの割合が多くなる傾向が認められる。

4) 日本海中部地震による液状化災害区域では、4 Hz以上の比較的高周波に明瞭なピークを有するタイプaが多く見いだされた。3ヶ所で行われたボーリング・PS検層および表層S波探査の結果から、これらのピークは池下浅所のS波速度の境界面と対応しているものと考えられる。

5) 地盤の液状化は砂の粒度・地下水位等とともに地表下ごく浅所の地質構造とも密接な関係があり、その意味で短周期微動の観測は液状化災害の予測に有効な手段となりうることを示唆された。

なお、上述した結果をふまえて液状化災害と微動特性との関係をさらに究明する目的で、1985年8月に能代市昭南町を中心とする地域で表層S波速度・地下水位・短周期微動の観測を密に実施したので、その検討結果については第2報で報告する。

謝 辞

本調査研究は能代市役所をはじめとし、ビック(株)・日本地下探査(株)・(株)東京ソイルリサーチ・日本物理探査(株)の御支援のもとに行われた。記して深く感謝の意を表す。

また、誤りや不備な点を指摘すると共に有意義な御討論いただいた本誌の査読者に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 1983年日本海中部地震災害秋田大学地質調査班(1984)：昭和58年5月26日日本海中部地震・地震と地盤災害の概要、昭和58年5月26日日本海中部地震能代市の災害記録(能代市)。
- 2) 秋田県総合地震対策研究会(代表、乗富一雄)(1984)：昭和58年日本海中部地震の記録・被害要因と実例。
- 3) 阿部 司・松島 寿・横山秀吉・微動研究グループ(1986)：能代市の地盤の液状化について、物理探査学会昭和61年春季講演会講演予稿集、pp. 13~14。
- 4) 微動研究グループ—野越三雄他6名—(1984)：能代市における微動調査について、物理探査学会昭和59年秋季講演会講演予稿集、pp. 38~39。
- 5) 微動研究グループ—野越三雄他6名—(1985a)：能代

- 市域における微動調査について, 昭和59年度東北地域災害科学研究発表会.
- 6) 微動研究グループ—斎藤徳美他 6 名—(1985b): 日本海中部地震 (1983年 5 月) による能代市の地盤災害と微動特性との関係, 地震学会講演予稿集昭和60年春季大会, p. 106.
 - 7) 微動研究グループ—斎藤徳美他 6 名—(1985c): 秋田県能代市における地盤のサイスマックゾーネーション, 物理探査学会昭和60年春季講演会講演予稿集, pp. 52~53.
 - 8) 微動研究グループ—斎藤徳美他 6 名—(1985d): 秋田県能代市における地盤災害 (1983, 日本海中部地震) と微動特性との関係, 物理探査学会昭和60年春季講演会講演予稿集, pp. 54~55.
 - 9) 微動研究グループ—海熊輝記他 6 名—(1985e): 能代の表層地盤と S 波速度測定について, 物理探査学会昭和60年春季講演会講演予稿集, pp. 56~57.
 - 10) 微動研究グループ—中村 操他 6 名—(1985f): 液状化地域における微動および S 波速度について—日本海中部地震による地中歪の評価を含めて—物理探査学会昭和60年度秋季講演会講演予稿集, pp. 3~4.
 - 11) 微動研究グループ—斎藤徳美他 6 名—(1986a): 日本海中部地震 (1983年 5 月) による能代市の地盤災害と微動特性との関係(II), 地震学会講演予稿集昭和61年度春季大会, p. 184.
 - 12) 微動研究グループ—毎熊輝記他 6 名—(1986b): 秋田県能代市の地盤特性と S 波速度, 物理探査学会昭和61年春季講演会講演予稿集, pp. 17~18.
 - 13) 微動研究グループ—斎藤徳美他 6 名—(1986c): 秋田県能代市における液状化災害と地盤振動特性との関係, 物理探査学会昭和61年春季講演会講演予稿集, pp. 15~16.
 - 14) 微動研究グループ—野越三雄他 6 名—(1986d): 1983年日本海中部地震による液状化被災地域における微動特性, 第 5 回自然災害学会学術講演会要旨集, 5, pp. 77~78.
 - 15) 微動研究グループ—野越三雄他 6 名—(1986e): 液状化被災地域における微動特性, 第 7 回日本地震工学シンポジウムプロシーディングス, pp. 277~282.
 - 16) 微動研究グループ—毎熊輝記他 6 名—(1987): 浅層地盤の土質特性と液状化発生に関する総合調査—日本海中部地震で被災した秋田県能代市の例—, 物理探査, vol. 40, no. 5, pp. 338~356.
 - 17) 中央開発株式会社 (1983): 1983年日本海中部地震震害報告書.
 - 18) 野越三雄・乗富一雄 (1979): 長・短周期微動と地下構造について, 物理探査, vol. 32, no. 3, pp. 17~28.
 - 19) 野越三雄 (1984): 1983年日本海中部地震のアンケート方式による高密度震度分布, 昭和58年 5 月日本海中部地震能代市の災害記録 (能代市).
 - 20) 能代市 (1984): 昭和58年 5 月 26 日日本海中部地震能代市の災害記録.
 - 21) ㈱応用地質調査事務所 (1984): 1983年 5 月 26 日日本海中部地震被害調査報告.
 - 22) 自然災害科学総合研究班 (代表, 乗富一雄) (1984): 1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究.