

札幌都市域における深部地下構造調査の現状

Deep Underground Structures beneath Sapporo Urban Districts

北海道大学大学院理学研究科

笹谷 努

Graduate School of Science, Hokkaido University

Tsutomu SASATANI

Abstract

Sapporo urban districts are located on a deep sedimentary basin in the western part of the Ishikari depression. It is important for evaluation of the seismic response of Sapporo urban districts to know deep underground structures. In this report we summarize various data relating to the underground structures. We have obtained a few deep-boring data to a depth of about 4000 m. The geological columns show that the deepest core has a geological time of Miocene (Tertiary). PS logging data to a depth of about 500 m have been obtained at several sites. They show low velocity surface layers with S-wave velocity of about 200 m/s and spatial variation of the velocity structures. We have estimated S-wave velocity structures under the northern part of Sapporo urban districts by the microtremor exploration method. The basement layer has S-wave velocity of about 3000 m/s at a depth of about 3000 m. Finally we have to note that our data set is quite limited in space.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震 (M7.2) による淡路島、神戸市での死者約6000人にも及ぶ大震災は、地震断層が都市のほぼ直下であったことに加えて、深さ約2 kmまでの地下構造が地震波を大きく增幅したことによると考えられている。この大震災を契機として、全国的に地域の地震防災対策が根本的に見なおされている。そして、地震調査研究推進本部の指導により、活断層調査や平野部地下構造調査等が全国規模で行なわれている。

人口約180万の札幌市を中心とした札幌都市域は、最近50-100万年間の沈降量が500 m以上に達する「大規模陥没堆積盆地（石狩低地帯）」に属している。この堆積盆地に位置する札幌都市域での地震動災害を評価するためには、地震動に強い影響を与える深部地下構造を把握することが第一に重要である（笹谷、2000）。その際に、地質断面図のみならず、特に、堆積層の物性値（S波速度）を得ることが重要である。本報告は、これまでに得られた札幌都市域の深部地下構造について、基礎資料としてまとめたものである。

2. ポーリング調査

石狩低地帯においては、石油・天然ガス資源の開発を目的とした、ポーリング調査、反射法地震探査等がふるくから行なわれてきたが、公開されているデータはわずかである。ここでは、札幌都市域において、これまでに公開されているポーリング調査結果と最近新たに行なわれた調査結果をまとめて整理する。

2.1 ポーリング調査（地質断面）

図1に、現在までに調査結果が公開されているポーリング坑の位置を示す。西札幌 SK-1D、西茨戸 SK-1、および基礎試錐「石狩湾」は、石油・天然ガス資源の開発のために行なわれた調査で、それぞれ1972年、1977年、1994年に掘削された。それらの調査結果は、北海道鉱業振興委員会（1979, 1990）、石油公団（1995）の冊子に報告されている。図2に西札幌 SK-1D、西茨戸 SK-1の地質断面図を示す。また、図3に基礎試錐「石狩湾」から西茨戸 SK-1にかけての地質断面図を示す（これは、ポーリング調査と反射法地震探査の結果を総合して作られたものである）。

これらから、札幌都市圏においては、完新世から中新世にかけての堆積層が深さ3000mから4000mまで存在していることがわかる。残念ながら、これらの堆積層のP波、S波速度の値に関しては、公開されていない。

札幌市は、札幌直下で発生する微小地震を監視する目的で、市内3ヶ所に深さ500mのボアホール地震計を設置し、1997年の春から観測を開始した。これは、地表での人工的なノイズを避けるためである。それらの観測点は、図1のMED（前田）、NKN（中沼）、STZ（里塚）である。地震計の設置に際して、ポーリング調査が行なわれた。表1は、報告書（札幌市、1997a, b, c）の結果をまとめたものである。図2と3を参照すると、地震計は第四系あるいは当別層に設置されていると考えられる。

表1. MED, NKN, STZにおけるポーリング調査結果（札幌市、1997a, b, c）。層厚、地質性状、PS検層結果（P波速度Vp; S波速度Vs）、各層の地質時代が示されている。

前田(MED) 508.5m							
層	層厚(m)	深さ(上限)	(下限)	地質性状	Vp(m/s)	Vs(m/s)	時代
1	49.4	0	49.4	礫混じり砂	1,540	210	完新世
2	77.4	49.4	126.8	礫混じりシルト・砂	1,770	330	
3	38.2	126.8	165	砂礫・礫混じり砂	1,900	430	
4	25	165	190	粘土	1,750	400	
5	197.8	190	387.8	シルト・粘土	1,900	570	
6	32.2	387.8	420	砂礫	2,050	760	
7	54	420	474	凝灰角礫岩	2,850	1,260	
8	48.5	474	522.5	凝灰角礫岩	2,510	950	
9	18	522.5	540.5	砂質凝灰岩	2,230	840	
計	540.5						

中沼(NKN) 502m							
層	層厚(m)	深さ(上限)	(下限)	地質性状	Vp(m/s)	Vs(m/s)	時代
1	12	0	12	泥炭・シルト	1,410	110	完新世
2	23	12	35	砂・砂礫・泥炭	1,520	270	
3	47	35	82	砂礫・礫混じり 砂・砂	1,720	460	
4	16	82	98	砂・砂礫	1,910	710	
5	67	98	165	砂・砂礫・シルト	1,820	620	
6	41	165	206	軽石混じり砂・礫 混じり砂	1,770	570	
7	54	206	260	砂・砂礫	2,130	840	
8	35	260	295	砂礫・礫混じり砂	1,940	780	
9	10	295	305	礫混じり砂	2,260	1,080	
10	130	305	435	礫混じり砂	2,020	860	
11	25	435	460	砂	2,020	920	
12	50	460	510	砂	2,200	1,020	
計	510						

里塚(STZ) 499m							
層	層厚(m)	深さ(上限)	(下限)	土質性状	Vp(m/s)	Vs(m/s)	時代
1	28.5	0	28.5	凝灰岩	1,530	320	更新世
2	37.5	28.5	66	砂礫・砂質土	1,780	610	
3	49	66	115	砂岩	1,860	630	
4	85.2	115	200.2	砂岩	2,000	630	
5	54.8	200.2	255	砂岩	2,000	670	
6	146.35	255	401.35	砂岩	2,100	780	
7	88.9	401.35	490.25	砂岩	2,070	820	
8	6.25	490.25	496.5	砂岩	2,160	920	
計	496.5						

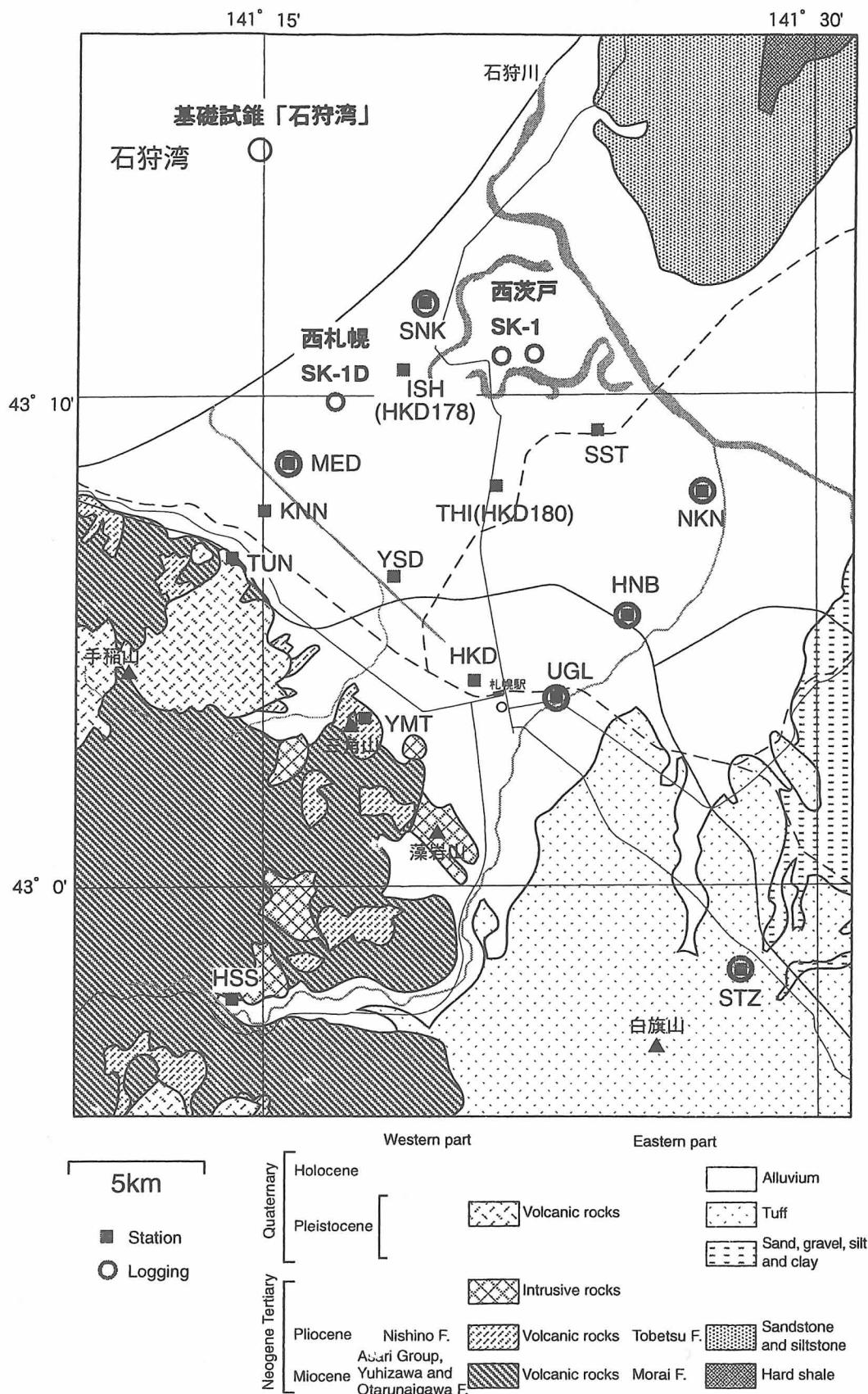


図1. 札幌都市域におけるボーリング調査地点(○印)。

強震観測点(■)と表層地質も示してある。

石田正夫・曾屋龍典(1980)に加筆・修正。

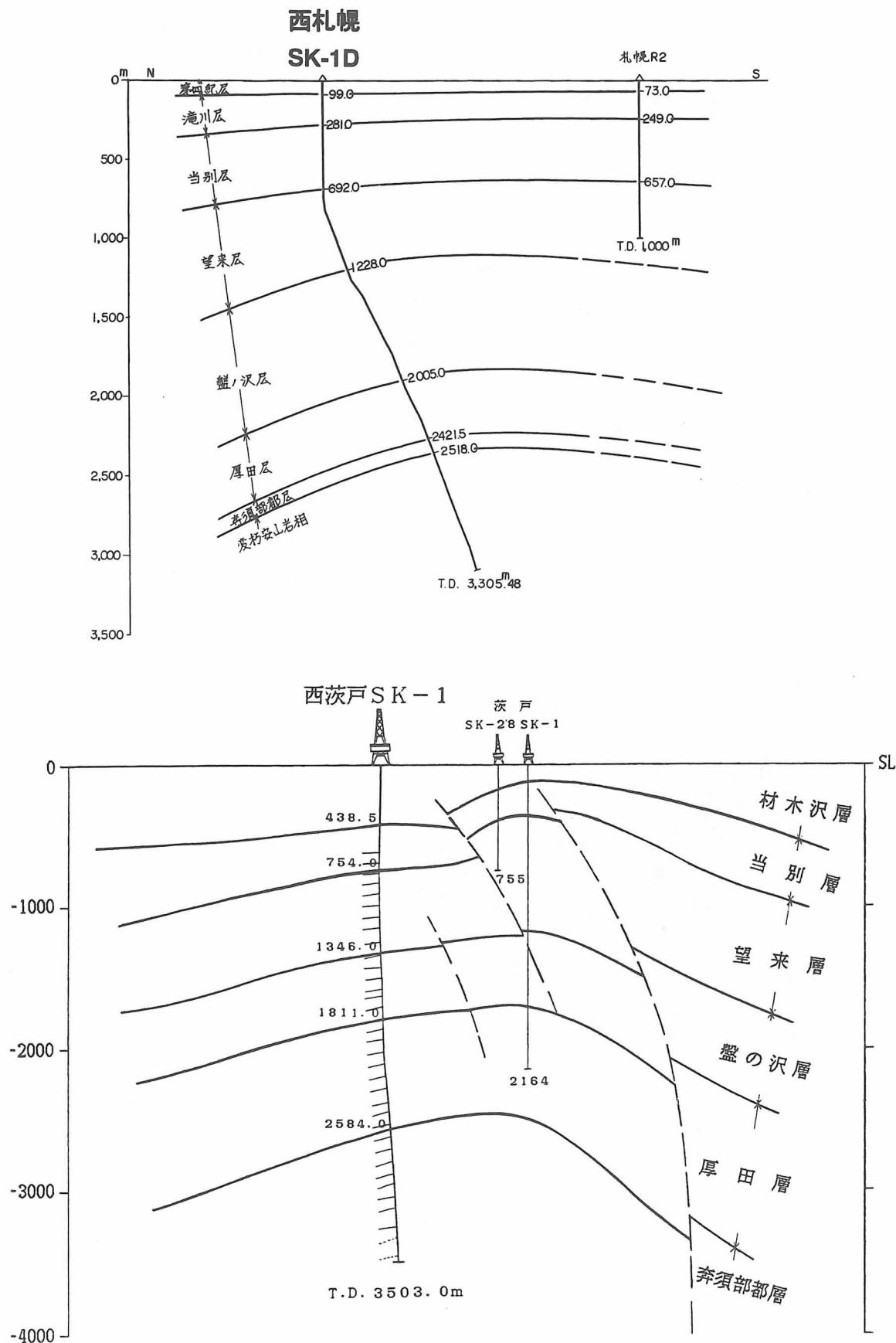


図2. 上：西札幌地質断面図（北海道鉱業振興委員会、1979）。
下：西茨戸 SK-1地質断面図（北海道鉱業振興委員会、1990）。

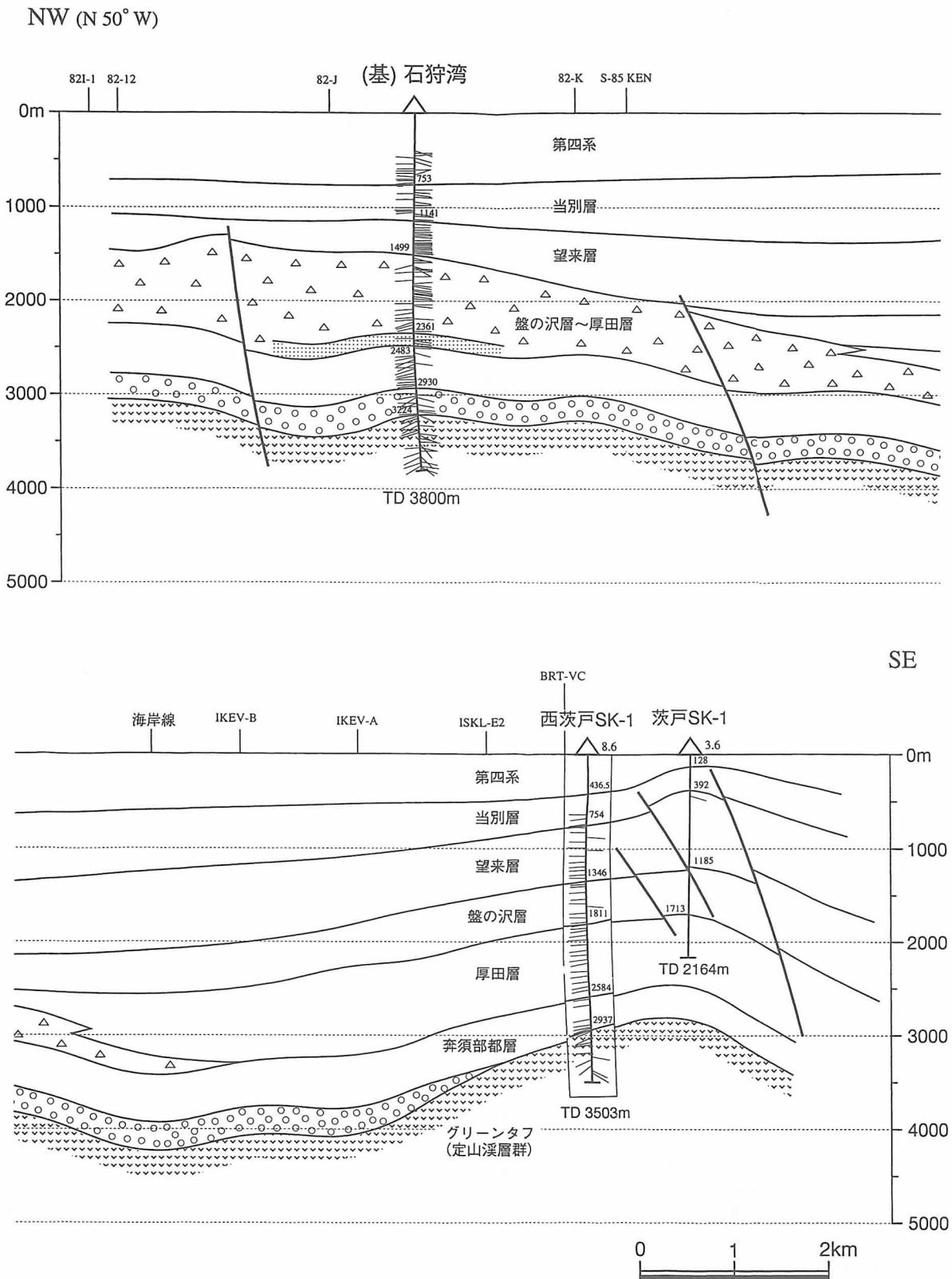


図3. 基礎試錐「石狩湾」から西茨戸 SK-1にかけての地質断面図
(石油公団、1995; 掲載許可済み)。

図1のSNK、HNB、UGLは、札幌地盤震動研究会(代表、笹谷努)が調査したボーリング坑の位置である。この研究会は、札幌都市域での地盤構造とそれが地震動に及ぼす影響に関する研究を推進するために、民間(上山試錐工業(株)、応用地質(株)札幌支社)と大学(北海道大学理学研究科、工学研究科)が協力して1996年春に結成したものである。1999年には、これまでの研究成果をまとめて報告書を出版した。以下においては、その報告書から、必要な部分を抜粋して示す。図4は、各ボーリング坑における簡略化した土質柱状図である。表1とこれらから、堆積環境の違いを反映して、各地点の柱状図もおおきく異なっていることがわかる。

約100 mよりも浅いボーリング調査結果は、数多く存在しているが、500 mよりも深い調査結果は、現在のところ、ここに示す程度である。ただし、市内に数多く存在する温泉ボーリング(深さ約1000 m)の調査結果については未整理である。

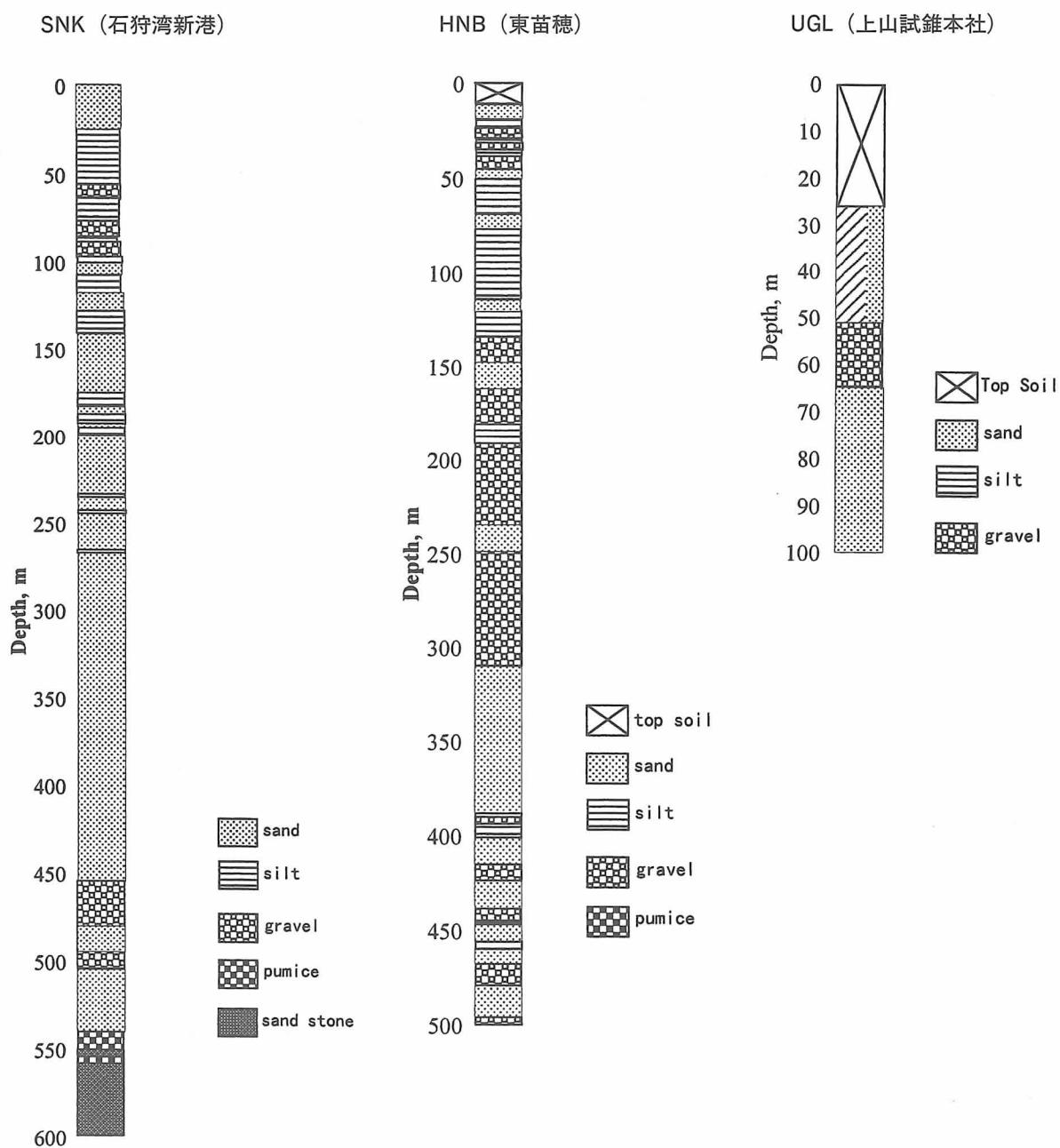


図4. SNK, HNB, UGLにおける簡略化された土質柱状図
(札幌地盤震動研究会、1999)。

2.2 速度検層結果

札幌市による3つのボアホール地震観測点および札幌地盤震動研究会による3つのボーリング坑において、孔内漂遊型の速度検層装置（サスペンション方式）による速度検層が行なわれている。この装置は、双極子型の起震源とそれから2m上方の受信器1と3m上方の受信機2を有している。起震源から発生されたP波（S波）を受信器1と受信器2とで同時に測定し、1m区間の伝播速度（ V_p, V_s ）を求める。通常、測定間隔は1mである。

測定結果（区間速度）の例を図5に示す。深くなるに従って速度が増大していることがわかる。また、礫層で速度がやや大きくなることも見てとれる。ここでは、ある深さ区間ごとに平均された区間速度を求めるのではなく、以下の操作で平滑化速度と構造を推定した。まず、1m区間を伝播した時間を累積し、通常の

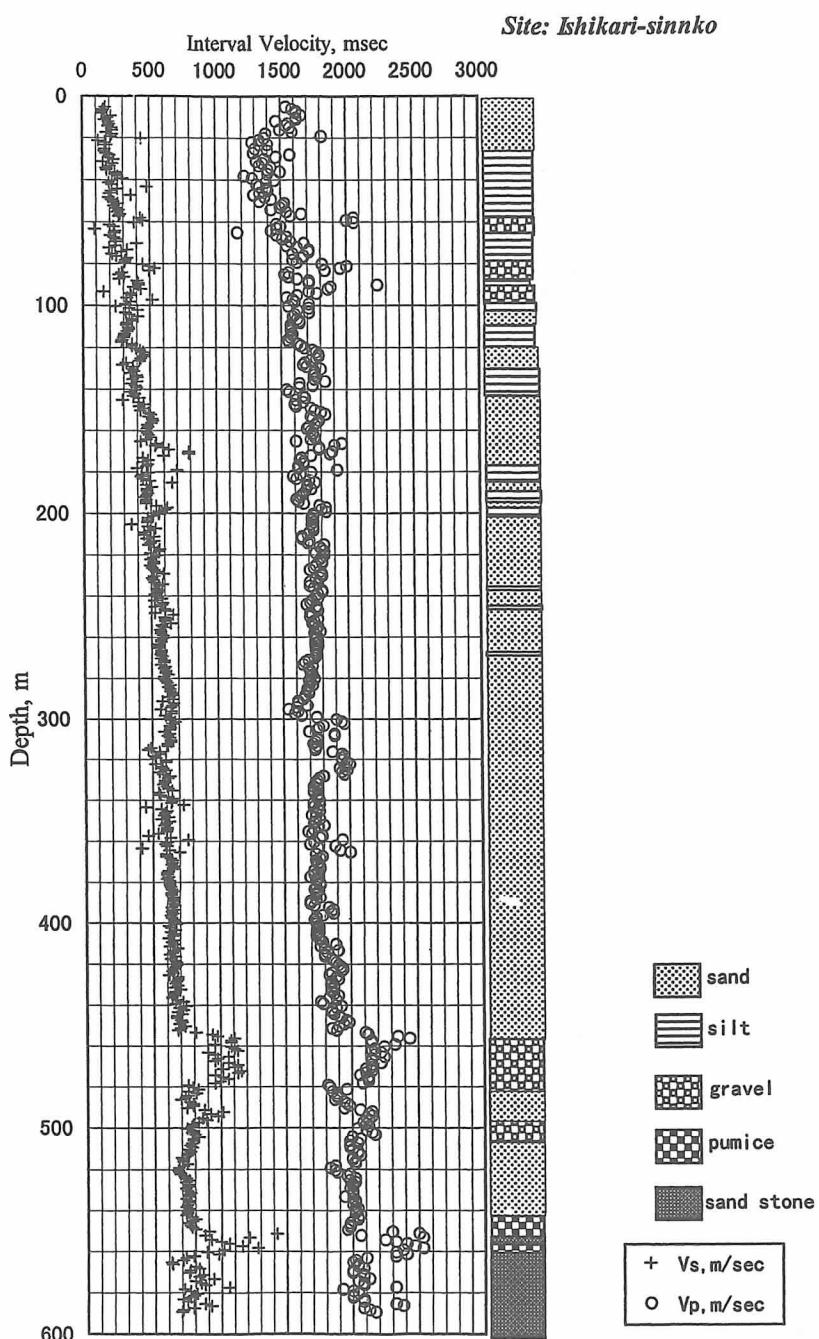


図5. 石狩湾新港（SNK）における区間速度の深度分布図。右端にボーリング調査による簡略化した土質柱状図を示す（長田、1999）。

「走時曲線」を得る。この走時曲線の傾きから平滑化された速度を、走時曲線の折れ曲がり点から平滑化速度の境界を求める（長田、1999）。図5に対するこの操作の結果を図6に示す。なお、MED, NKN, STZにおける速度構造は、表1に示してある。

図7と図8は、札幌市のボーリング坑、札幌地盤震動研究会のボーリング坑での速度構造をまとめたものである。ここでは、S波速度に注目して、これらの特徴について記す。まず、最表層は、250 m/s、あるいは、それ以下と言うべきで遅い速度を有している。また、表1、図4で見られた土質柱状図の違いを反映して、深さに対する速度の増加の様子が各点で異なっている。例えば、速度700 m/sとなる深さが、NKNでは約210 m、MEDでは約390 m、SNKでは約450 mと、海岸に向かってだんだんと深くなっている。一方、STZで

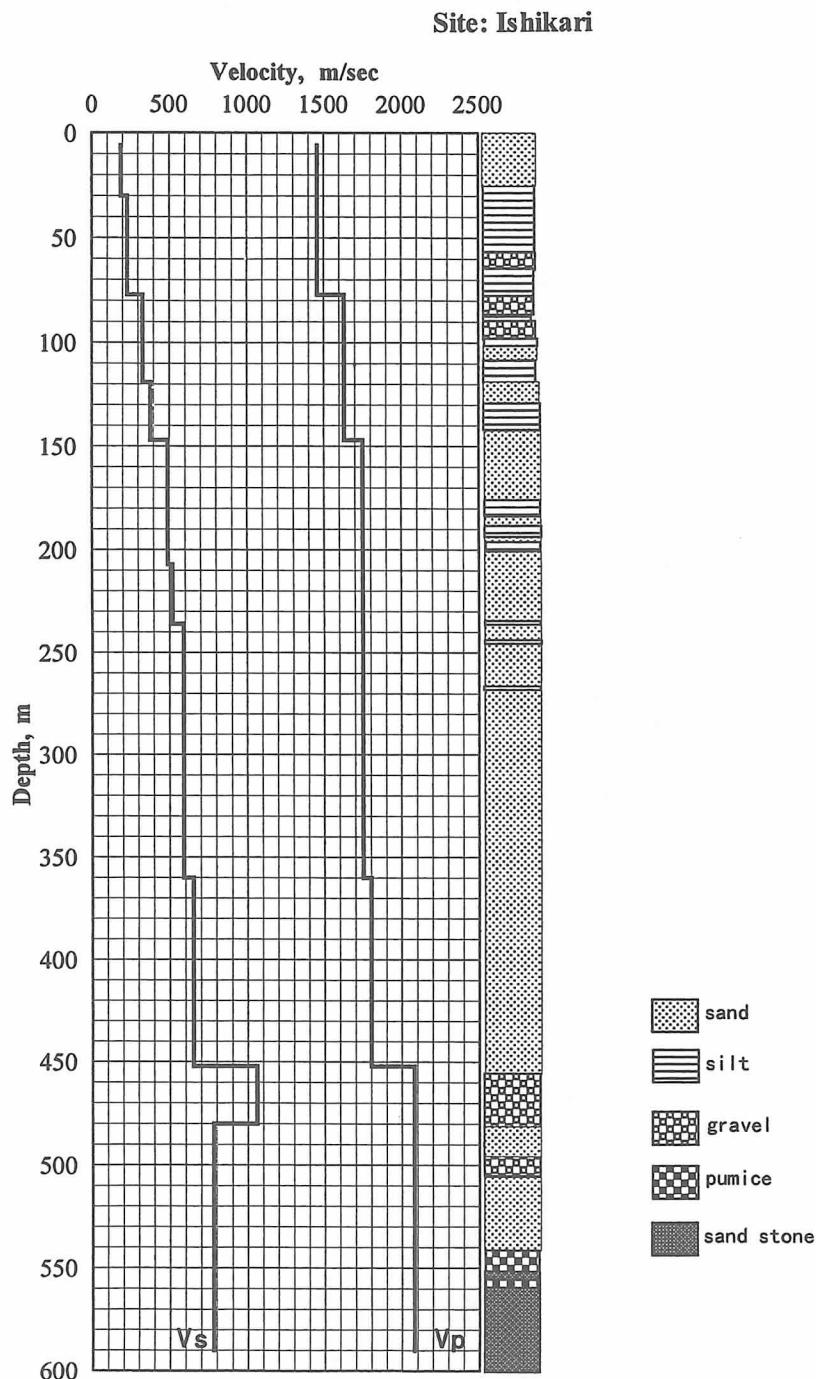


図6 . SNKにおける速度構造と土質柱状図（長田、1999）。

は、厚さ約30 m、S波速度約300 m/sの砂礫・砂質土の下に速度約600 m/sの砂岩が存在し、他の地点とは異なった地盤となっている。このように、札幌都市域では、水平方向にも深さ方向にも速度構造が変化しており、これが地震動の水平変動の要因になると考えられる。また、深さ500 mでのS波速度は、800 m/sから1000 m/sで、いわゆる地震基盤（約3000 m/s）とは見なせない。

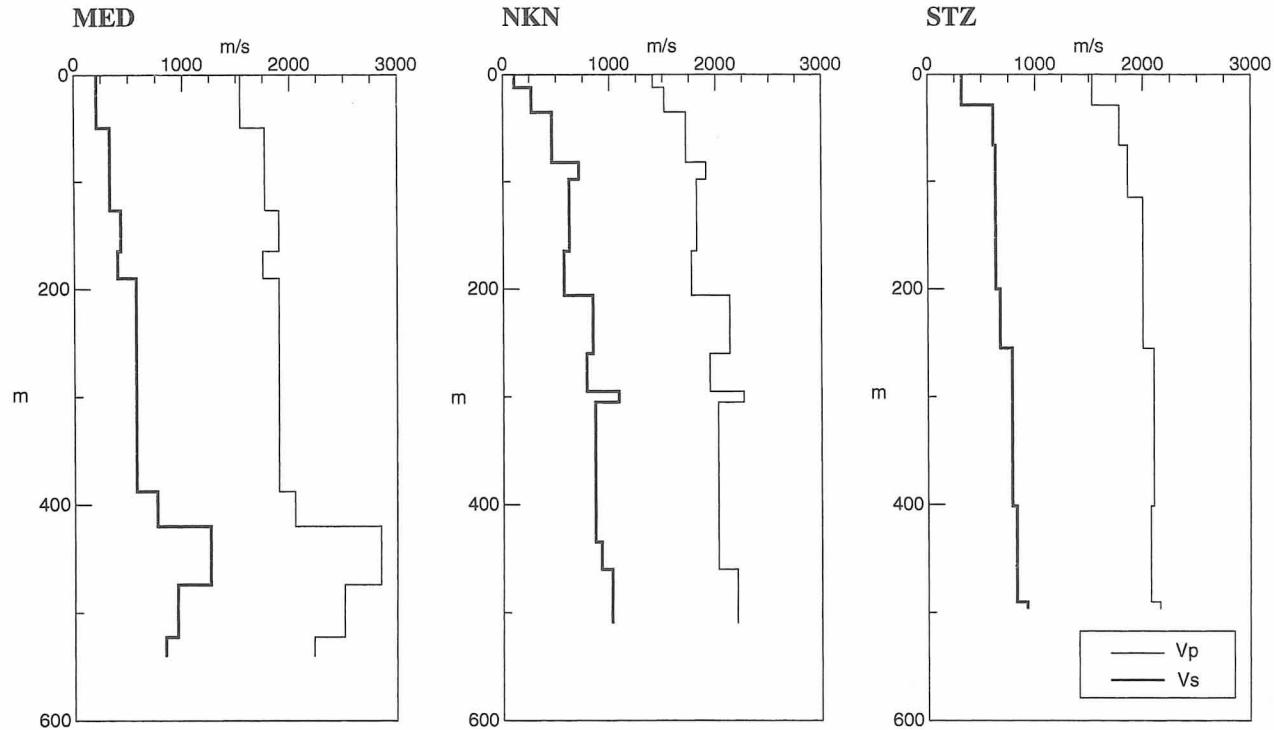


図7 . MED, NKN, STZ における速度構造。

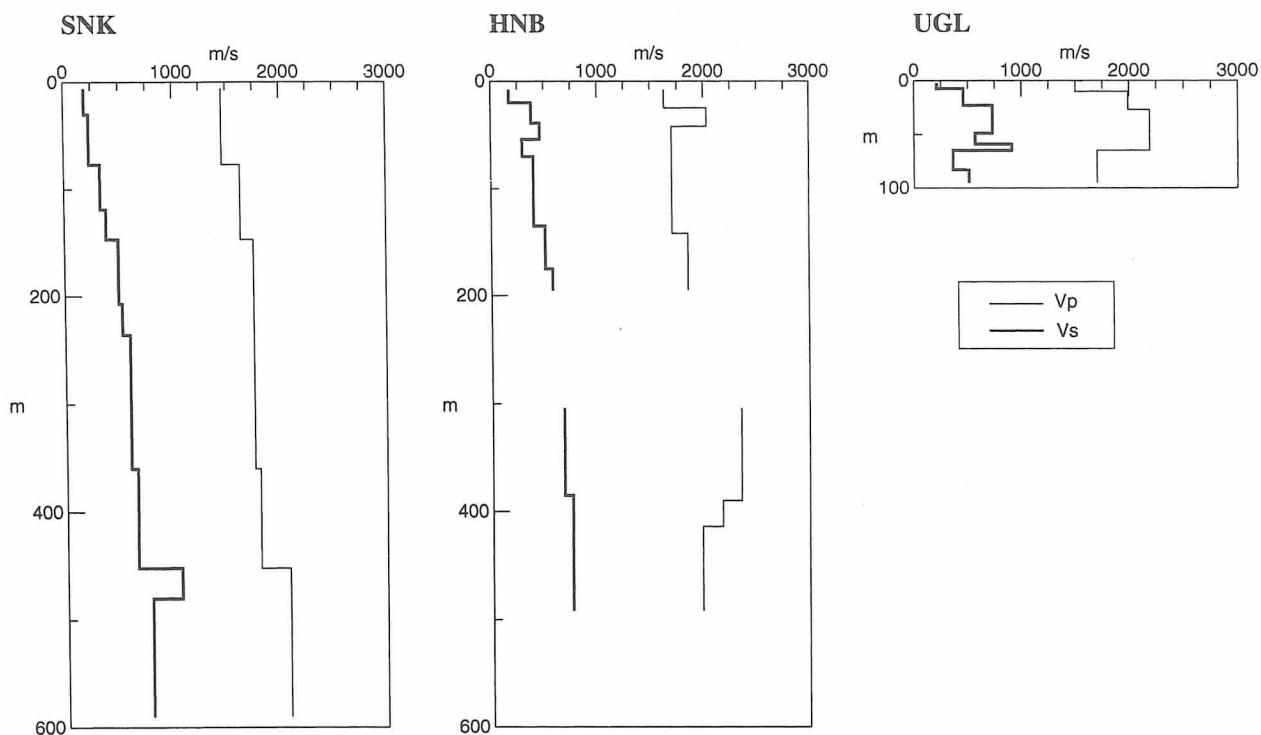


図8 . SNK, HNB, UGL における速度構造。

3. 微動探査法による調査

地下構造を調査する方法として、屈折法・反射法地震探査が有力であるが、これには多額の経費が必要である。また、地震動へ大きな影響を与える S 波速度を推定するためには、まだ技術的な問題が残っている。最近、S 波速度を推定する方法として、自然に豊富にある「微動」を利用した探査法、「微動探査法」が注目されている（岡田、1998）。その原理は、微動に含まれる表面波の分散、すなわち位相速度対周波数（周期）の関係を検出し、これを逆解析して S 波速度の地下構造を推定する、というものである。ここでは、微動探査法による札幌都市域北部の深部地下構造の推定結果と、それが地震動に与える影響の予備的な解析結果について報告する。

3.1 観測

微動のアレー観測サイトとしては、強震動観測点近傍で、かつ、出来るだけ地質断面や深層ボーリング調査データのある所が選択された。観測サイトを図 9 に示す。MED9, SNK, NKN, HNB サイトでは、深さ約 500 m までの PS 検層結果がある（図 7, 8；札幌地盤震動研究会、1999）。また、MED9 サイト付近では深さ約 1 km までの反射断面（笠谷・他、1998）、SNK サイトでは、この点を通る深さ約 4 km までの地質断面が得られている（図 3；石油公団、1995）。これらの情報は、微動探査法においてレイリー波の位相速度から S 波速度構造を推定する際に利用される。

観測は、1998年の7月後半と1999年の5月後半に行われた。98年7月後半の観測においては、長周期側の微動のパワーがきわめて弱く、長周期側でのレイリー波の位相速度が求められなかった。それは、深部地下構造の推定が困難であることを意味している。それで、次年度に時期を変えて5月後半に再測した。その結果、周期4秒以上まで位相速度を得ることができた。図 9 において□で示したサイトで98年と99年の2度にわたって観測が行われた。ここでは、2度の観測で長周期まで位相速度が得られたこれらのサイトの結果について示す。

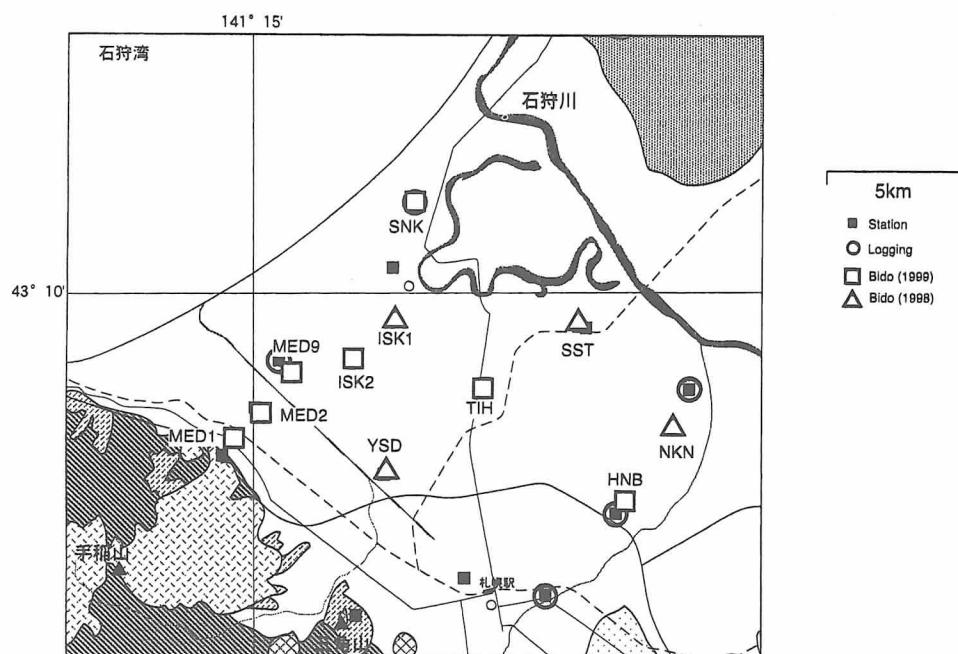


図 9. 微動観測サイトの位置図。□：1999年度探査、△：1998年度探査。

地質図は石田正夫・曾屋龍典（1980）に加筆・修正。

微動探査法としては、空間自己相関法（略称、SPAC 法）を採用した。観測に用いたアレーは、円の中心観測点を共有し半径の異なる円周上にそれぞれ等間隔に 3 観測点を配置する、いわゆる多重円形アレーである（図10）。アレー半径は、50 m から 2000 m まで変化させた。各観測点には、LE・3D/5S 地震計（Lennartz Electronic 社；固有周期 5 秒、速度計）を設置し、データロガー LS-8000SH（白山工業社）に 100 Hz サンプリングでデータを収録した。解析には上下動成分のデータのみを用い、「レイリー波の基本モードが最も卓越している」という仮定のもとに解析した。

観測された微動記録の例を図11に示す。これは、ISK2サイトでアレー半径 2000 m の 7 観測点からなる二重円形アレーで観測された 10 分間の記録である。この記録から切り出された約 82 秒間にについて求めた 7 観測点のパワースペクトルが図12に示してある。全体のスペクトルパターンはよく類似していることが分かる。より細かく見ると、周波数 3 Hz 以上で 1 点だけ他の点とスペクトルパターンが異なっている。このような検討をすべてのサイトで行ない、その結果、位相速度の推定可能な周波数の上限を約 3 Hz とした。

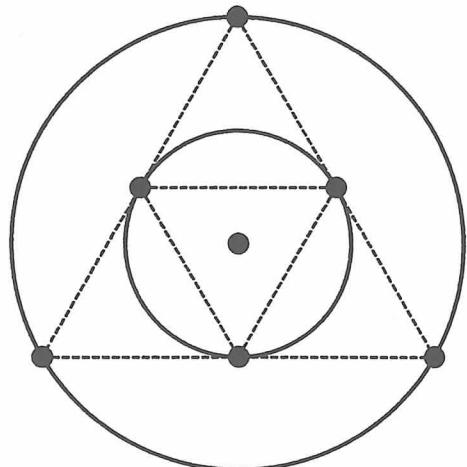


図10. 半径の異なる 2 つの円形アレーを組み合わせた 7 観測点からなるアレー。

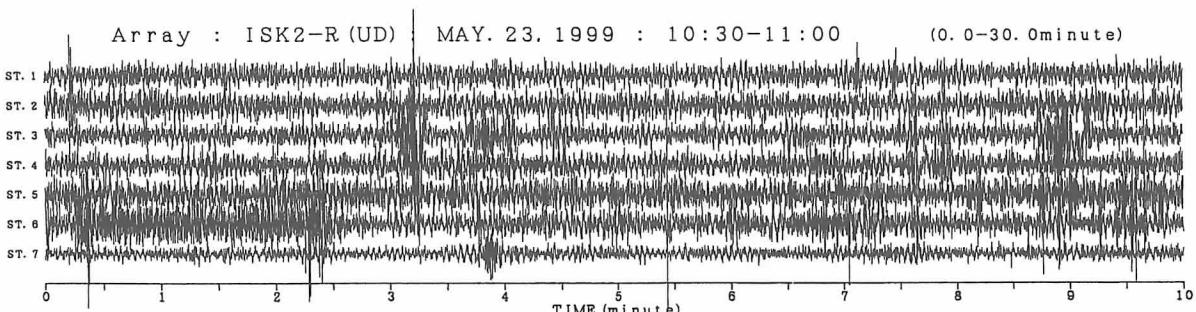


図11. 観測波形の例 (ISK2サイト、アレー半径=2000 m、10分間)

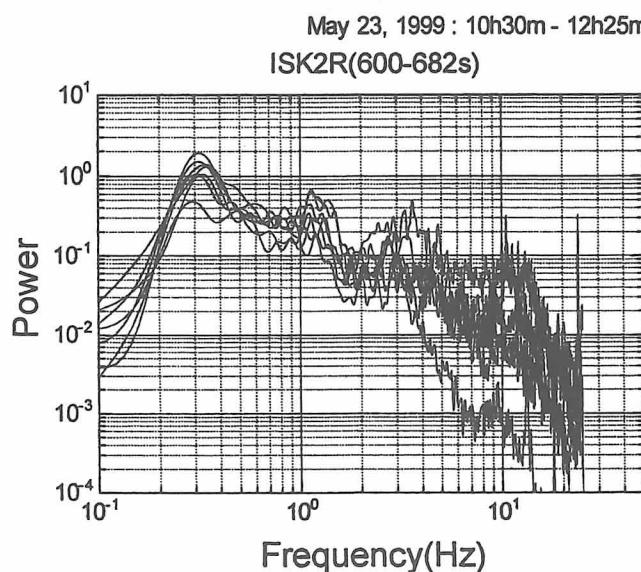


図12. ISK2サイトの記録約82秒間にについて求めた 7 観測点のパワースペクトル。

3.2 位相速度の推定

円周上に3個以上の観測点を配置し、それらの観測点それぞれについて得られる空間自己相関関数の方位平均をアレー空間の微動のパワーで規格化した量、すなわち半径 r の円形アレー空間内の自己相関係数 $\rho(f;r)$ をいろいろな周波数について求める(岡田、1998)。微動の上下動成分がレイリー波の基本モードからなるとすれば、この空間自己相関係数は、次式のように周波数 f をパラメータとし、アレー半径 r と位相速度からなる量、 $2\pi fr/c$ 、を変数とする第一種0次のベッセル関数で表わされることが理論的に導かれている(岡田、1998)。

$$\rho(f;r) = J_0(2\pi fr/c)$$

この関係より、観測から得られる空間自己相関係数をベッセル関数の逆関数として解き、位相速度 c を周波数の関数として得ることができる。

6サイトで得られた位相速度を図13に示す。これらの位相速度の分散は非常に良く似ており、地下構造は層構成や層境界の深さの点で大きく違っていないことを示唆している。

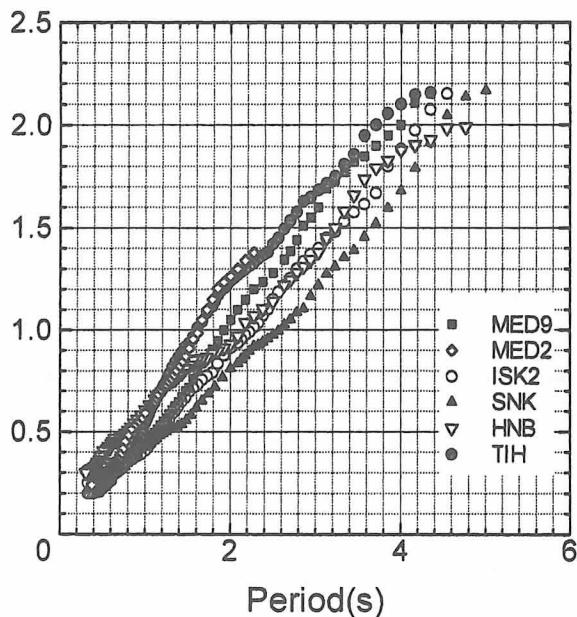


図13. 微動探査法によって推定された
レイリー波の位相速度。

3.3 地下構造の推定

位相速度の分散から地下構造を推定する、いわゆる逆問題の解法には、個体群探索型遺伝的アルゴリズムfGA(長・他、1999)を適用した。fGAでは、初期値として、層の数、各層のS波速度の上限と下限を与え、この上限下限の範囲内で分散の最適解となる地下構造を推定する。

今回の逆解析では、深さ約500 mまでの構造は、PS検層結果(札幌地盤震動研究会、1999)を参照して初期値とし、それよりも深い構造は、SNK近傍で得られている地質断面図(図3;石油公団、1995)を参照して層数を決め、各層のS波速度は十分幅広くとった初期値を設定した。GAによる逆解析を適用する際に、このような事前情報を基に探索範囲を設定することにより、十分な精度でS波速度構造の推定が可能となる(松岡・他、2000)。

推定されたS波速度構造に基づく位相速度と観測値との比較の例を図14に示す。また、図15は、基にした地質断面に推定されたS波速度構造を書き加えたものである。推定された速度の境界面は、地質断面と良い

一致を示している。この図で、各層の S 波速度を推定できた意味は大きい。深部構造が推定された 5 サイトでの S 波速度構造をまとめて示したのが図16である。S 波速度の深さによる変化は、深さ 200 m 未満を除き、緩やかに増加し、著しい速度コントラストの境界が見当たらない。また、深さ約 3 km で S 波速度は約 3 km/s となっている。

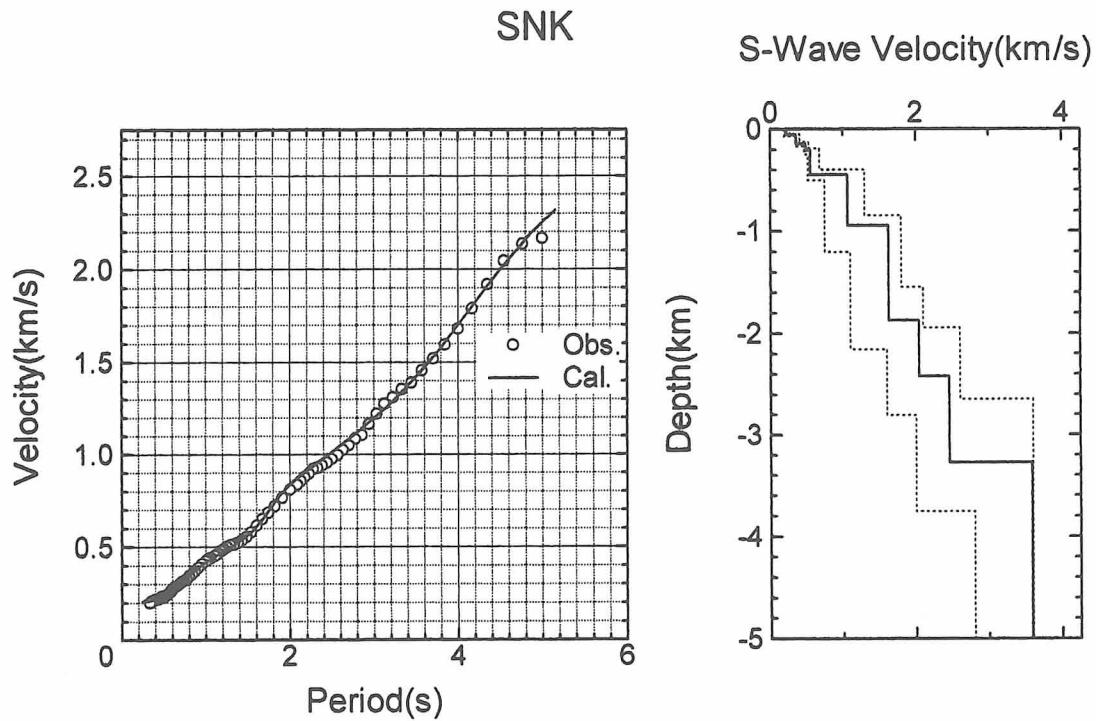


図14. 位相速度から推定された S 波速度構造。右図には、遺伝的アルゴリズムによる構造の探索範囲も示されている。

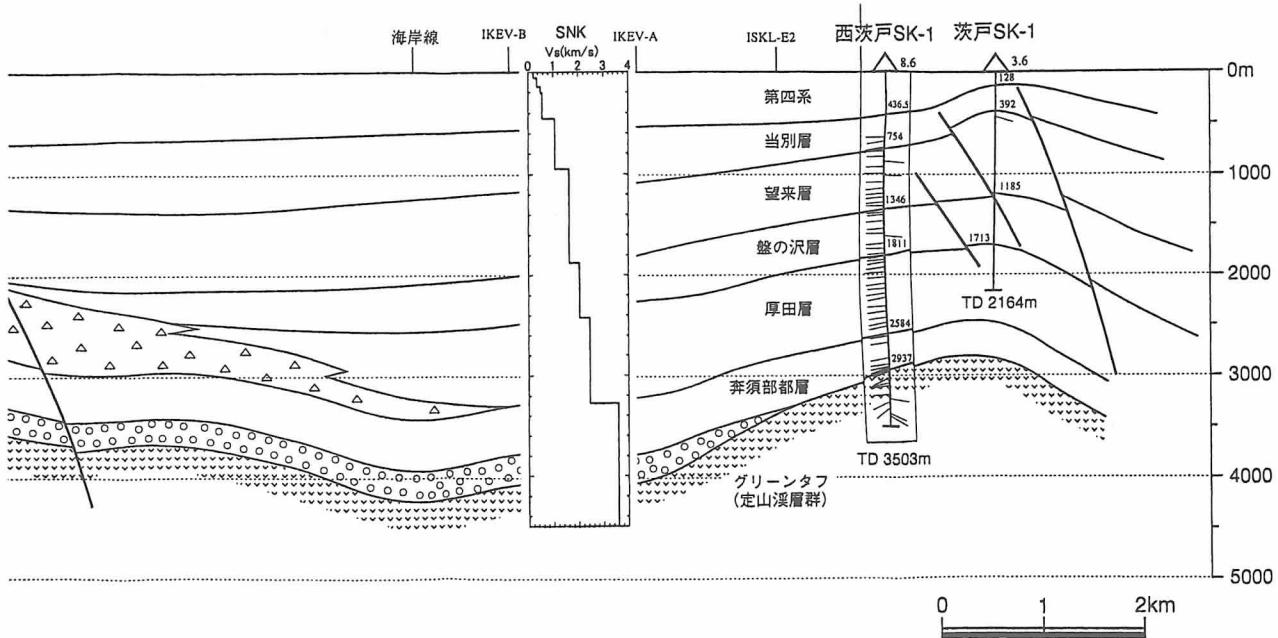


図15. 札幌市北部の茨戸から北西方向にかけての地質断面図（石油公団、1995）。これに微動探査法により推定された SNK サイトの地下構造が書き加えてある。

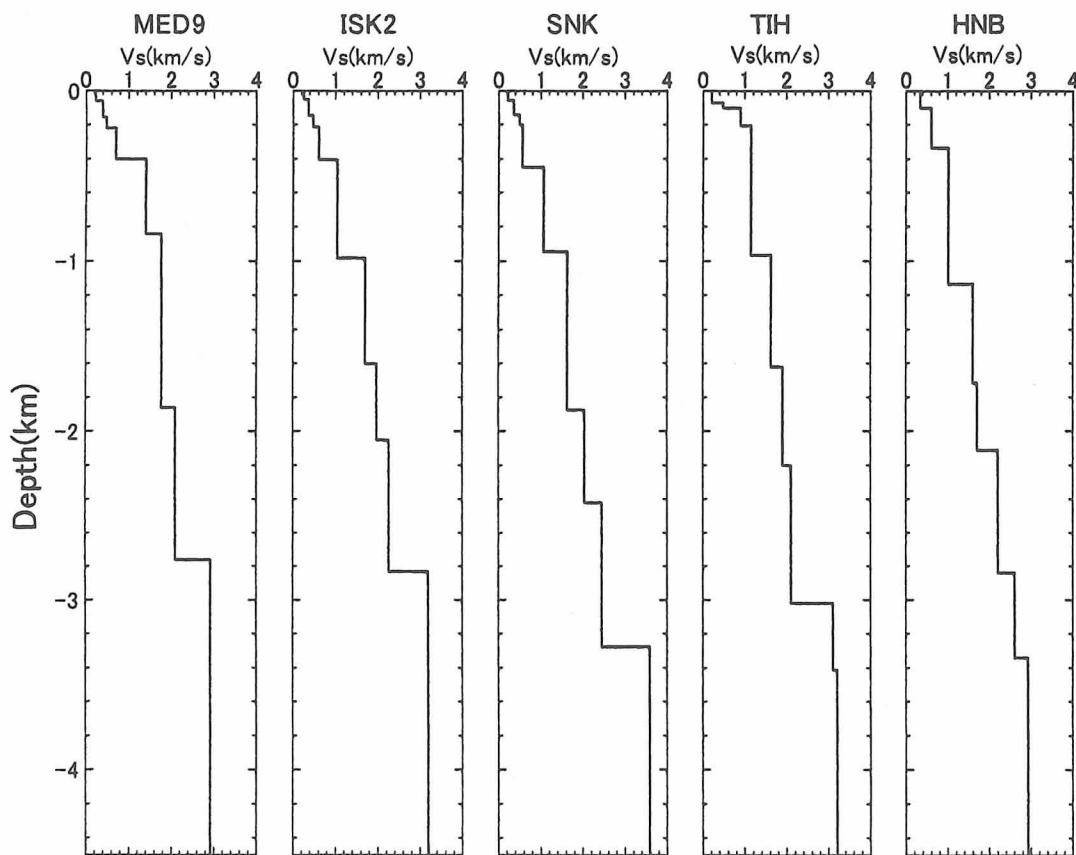


図16. 微動探査法により推定された S 波速度構造。

3.4 地下構造と地震動

推定された地下構造が地震動に与える影響を、観測記録に基づいて検討する。S 波構造のチェックに際し、鉛直入射の S 波に対する応答を見るのが簡単な方法である。そこで、札幌付近直下で発生したやや深発地震による記録を解析に用いる。図17左にその震央と観測点を、その右に観測記録の例を示す。岩盤上の観測点 HSS に対して堆積盆地上的 MED では S 波が約 5 倍ほど增幅されていることが分かる。HSS での記録を札

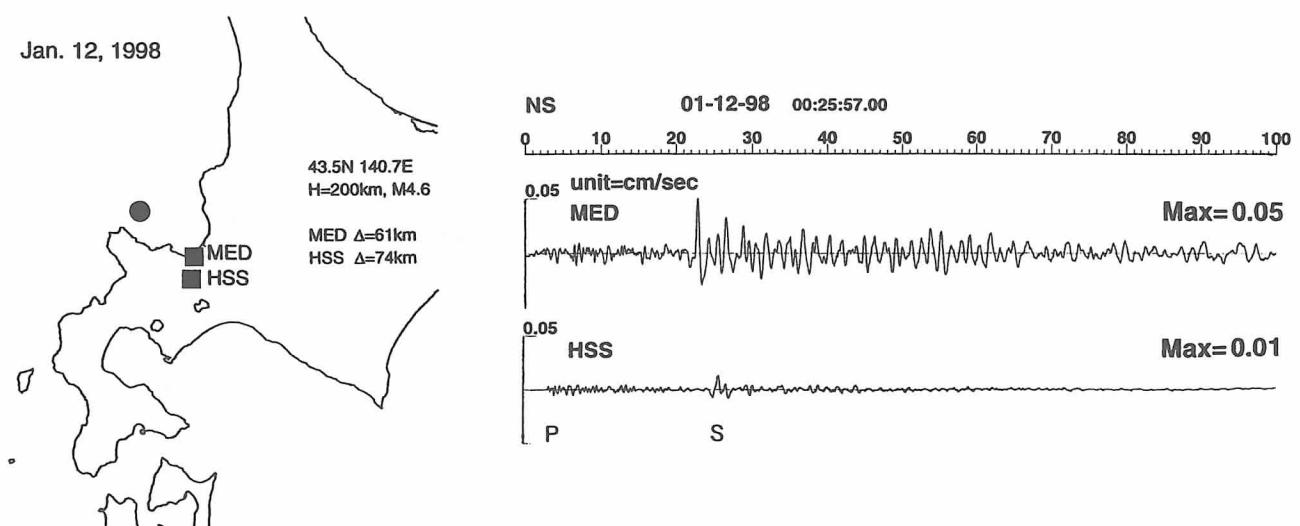


図17. 左：解析に用いた地震の震央（●）と観測点（■）。
右：観測された波形の例（NS 成分）。

幌都市域直下への入射波と仮定し、微動探査法で推定された構造(MED9)に対する応答の計算結果を図18に示す。計算波形は、直達S波部分に注目すれば、観測波形をうまく説明している。これは、推定された構造が妥当であることを示している。予備的な解析例ではあるが、このような解析を行なって推定された構造の妥当性を確認することが重要と考える。

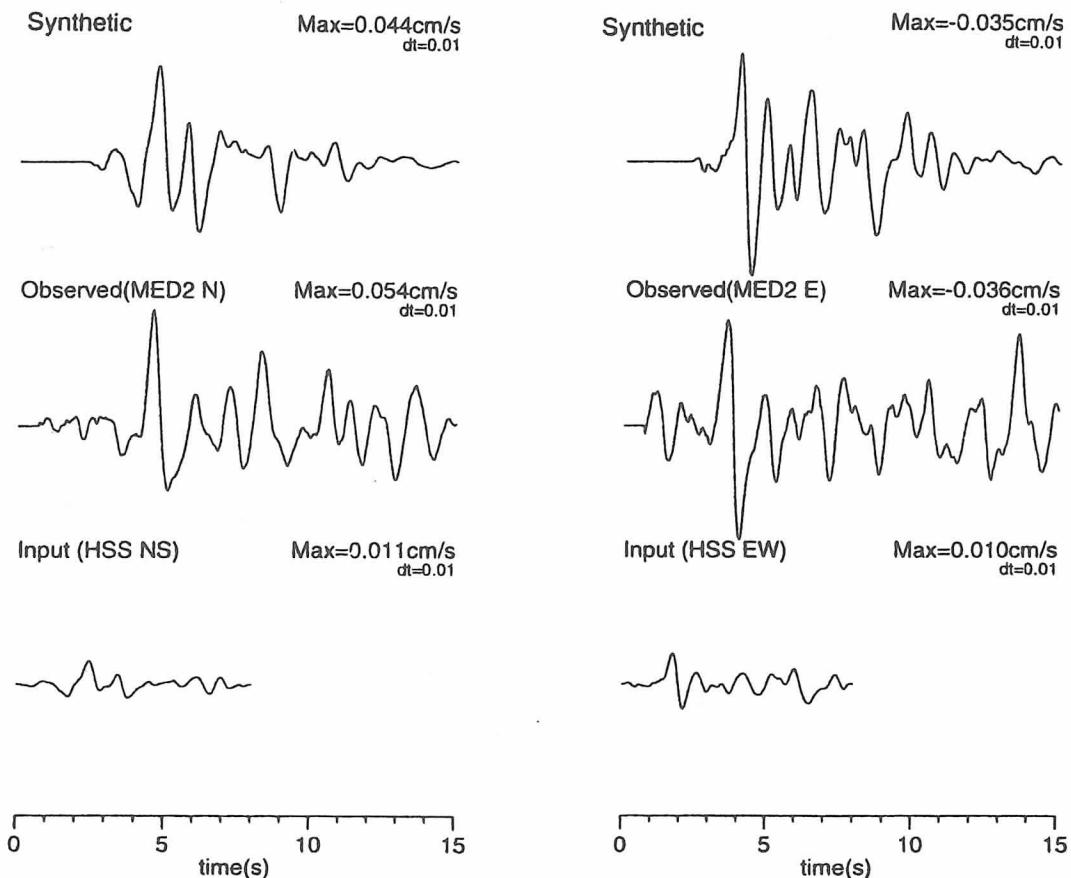


図18. 計算された地震応答（理論波形）と観測波形の比較。

左：NS成分、右：EW成分。

4. 深部地下構造調査のまとめ

これまでに述べた札幌都市域における深部地下構造の調査結果について、簡単にまとめる。

○深度約500 mまでの速度検層結果によると、S波速度は、最表層の約250 m/sから深さとともにその値を徐々に大きくしている。大局的に、低速度の堆積層が海岸に向かって厚くなっているが、堆積環境の違いを反映して各地の速度構造にかなりの変化が見られる。

○石油・天然ガス資源の開発を目的としたボーリング調査結果によると、札幌都市域の下には完新世から中新世にかけての堆積層が3000 mから4000 mまで存在している。

○微動探査法によってこれらの厚い堆積層のS波速度構造が得られ、深さ約3000 mでS波速度約3000 m/sを示している。

これら平野部での深部地下構造とともに、平野と山地の境界部での地下構造も強震動の解釈に重要である。ここで、これに関係した地質断面図を引用する。岡・他（1991）は、札幌市街下と西野地域の地表地質、坑井地質、FT（フィッショントラック）年代測定および珪藻化石解析をもとに、札幌市の西野から北海道大学付近にかけての地質断面図（図19）を得た。これから、西野層、小樽内川層が山地に向かって浅くなっていることがわかる。しかし、この図から判断する限り、その傾斜角はそれほどおおきくはない（約10°）。いずれにしても、平野部の深部地下構造とともに、この平野と山地の境界構造の推定も強震動評価において重要な課題である。

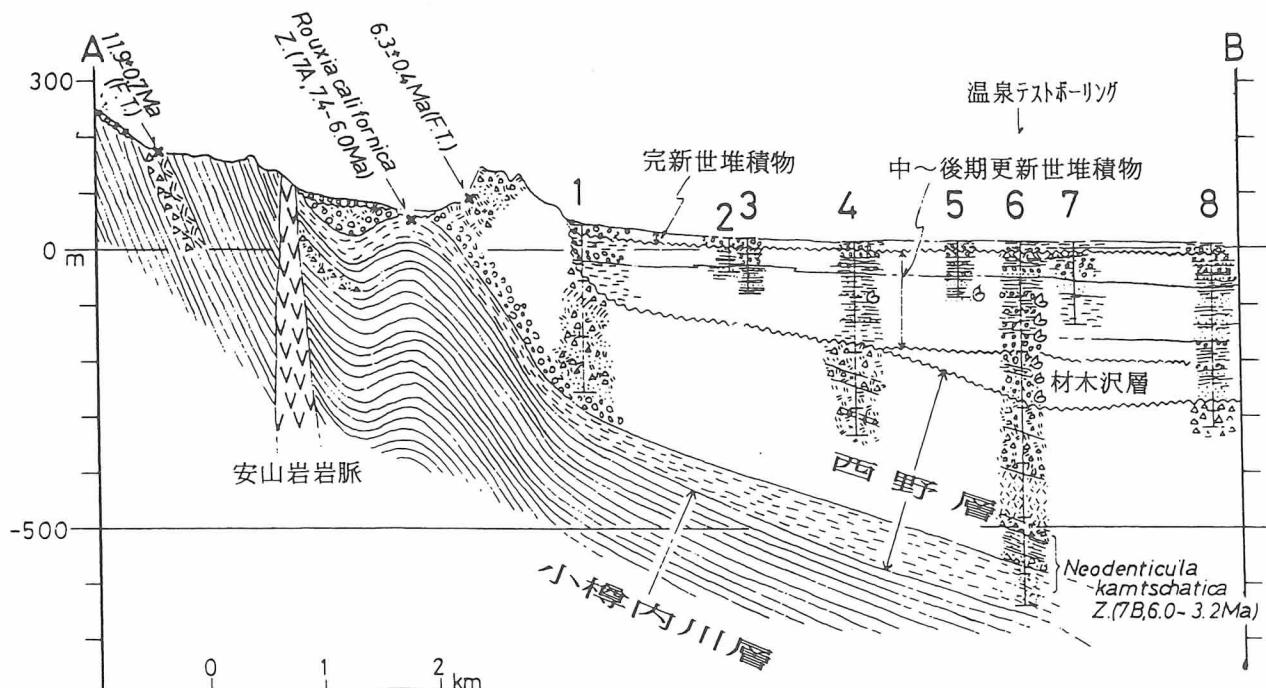
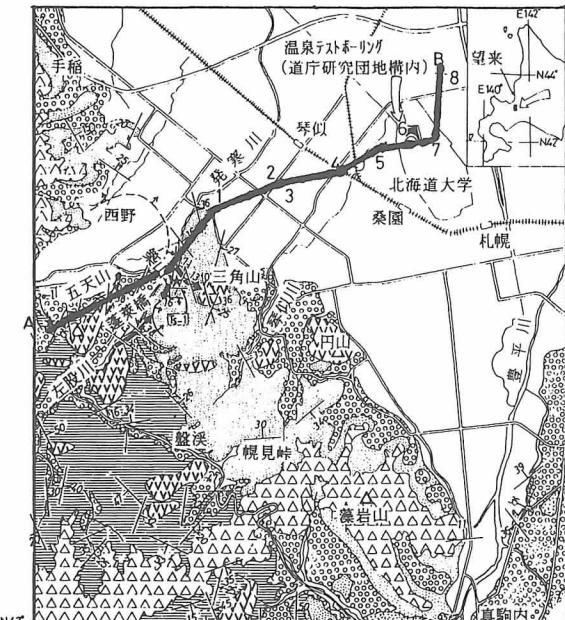


図19. 札幌市の西野から北海道大学付近にかけての地質断面図（岡、1997；岡・他、1991原図・加筆）。上図に断面線を示す。

謝　　辞

本調査は、大学と民間企業との共同研究によるところが大である。レーリー波の位相速度から S 波構造を推定する際に、石油公団による地質断面を参照した。また、本調査の野外観測においては、北海道大学理学研究科の多くの学生から協力を得た。併せてここに謝意を表する。なお、本研究の費用の一部は、平成10, 11 年度文部省科学研究費（基盤研究（B）（2）課題番号10480090；研究代表者、北海道大学理学研究科 笹谷努）による。

参 考 文 献

- 長郁夫・他、1999. 物理探査、52, 227-246.
- 北海道鉱業振興委員会、1979. 北海道の石油・天然ガス資源—その探査と開発（昭和43年～51年）、p. 205.
- 北海道鉱業振興委員会、1990. 北海道の石油・天然ガス資源—その探査と開発（昭和52年～63年）、p. 157.
- 松岡達郎・他、2000. 物理探査、53, 12-28.
- 岡孝雄・奥水達司・高橋功二・秋葉文雄、1991. 札幌市街下と西野地域の小樽内川層および西野層の時代と対比、地質学雑誌、97, 25-38.
- 岡孝雄、1997. 北海道とその周辺海域のネオテクトニクスに関する諸問題一付、札幌付近での活断層の存在と地震発生についての考察、加藤誠教授退官記念論文集、427-449.
- 岡田広、1998. 物理探査ハンドブック（手法編）、物理探査学会、203-211.
- 長田正樹、1999. 速度検層結果について、「札幌都市域における地盤構造調査と強震動観測」札幌地盤震動研究会、30-67.
- 笹谷努・他、1998. 物理探査学会第98回学術講演会論文集、140-144.
- 笹谷努、2000. 第1回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集、科学技術庁、1-9.
- 札幌市、1997a, b, c. 札幌市平成8年度地震調査観測施設整備さく井工事（その1）報告書、（その2）報告書、（その3）報告書.
- 札幌地盤震動研究会、1999. 札幌都市域における地盤構造調査と強震動観測、p. 162.
- 石油公団、1995. 平成6年度 国内石油・天然ガス基礎調査、基礎試錐「石狩湾」調査報告書.