



Title	石狩平野北西部における微動アレー探査
Author(s)	吉田, 邦一; 笹谷, 努; 前田, 宜浩; 高井, 伸雄; 三輪田, 吾郎; 大畠, 大志郎; Prasad, Dhakal Yadab; 鏡味, 洋史; Fat-Helbary, Raafat El-Shafei
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 159-173
Issue Date	2010-03-19
DOI	10.14943/gbhu.73.159
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/44471
Type	bulletin (article)
File Information	73_15_p159-173.pdf



[Instructions for use](#)

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 73, March 2010, pp. 159–173

石狩平野北西部における微動アレー探査

吉田 邦一^{*1}

産業技術総合研究所活断層研究センター

笛谷 努^{*2}・前田 宜浩^{*3}

北海道大学大学院理学研究科

高井 伸雄・三輪田吾郎^{*4}・大畠大志郎^{*5}・Dhakal Yadab Prasad・鏡味 洋史

北海道大学大学院工学研究科

Raafat El-Shafei Fat-Helbary

アスワン地震センター

(2010年1月7日受理)

Microtremor Array Survey in the Northwestern Part of the Ishikari Plain

Kunikazu YOSHIDA

Active Fault Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Tsutomu SASATANI, Takahiro MAEDA

Faculty of Science, Hokkaido University

Nobuo TAKAI, Goro MIWADA, Daishiro OHATA, Dhakal Yadab Prasad, Hiroshi KAGAMI

Hokkaido University

and

Raafat El -Shafei Fat-Helbary

Aswan Earthquake Research Center

(Received January 7, 2010)

^{*1} 現所属：財団法人地域地盤環境研究所, Geo-Research Institute

^{*2} 現所属：北海道大学大学院工学研究科, Faculty of Engineering, Hokkaido University

^{*3} 現所属：カリフォルニア大学サンタバーバラ校, University of California, Santa Barbara

^{*4} 現所属：株式会社大林組, Obayashi Corporation

^{*5} 現所属：あいおい損害保険株式会社, Aioi Insurance Co. Ltd.

S-wave velocity structures were explored in the northwestern part of Ishikari plain from microtremor array measurements. We measured microtremors using seismometer arrays at 3 sites on 4 days during May - July 2005. Phase velocities in a frequency range of 0.22 - 4.32 Hz were estimated using SPAC (SPatial AutoCorrelation) analysis of the microtremor records. The S-wave velocity structures were obtained by the inversion from the phase velocities using a genetic algorithm technique. The inverted S-wave velocity structures obtained from the microtremor array surveys in the present and previous studies indicate that the S-wave velocities of a geologic layer clearly depend on the depth.

I. はじめに

石狩平野には厚い新第三紀以降の堆積層が存在し、地震動はこの堆積層の影響を強く受けていることが知られている。例えば、笹谷・他（2001）は、石狩湾新港周辺で行われた微動探査と石油探査の結果から、地震基盤の上に厚さ 3 km 以上の堆積層があり、近傍で観測された地震動記録はこの堆積層により增幅を受けていることを示した。その後、2003 年十勝沖地震の際には、石狩平野やその南方延長の勇払平野において、堆積層の影響により長周期地震動が強く励起され、苫小牧において石油タンクのスロッシングを引き起こし、タンク火災につながった。石狩平野北西部においても石狩湾新港で石油タンクのスロッシングにより浮き屋根が破壊された（畠山・他、2004；吉田・笹谷、2005）。

十勝沖地震の際には、石狩湾新港周辺では、周期約 5 秒の地震動の応答振幅が局所的に増大していた（吉田・笹谷、2005）。この局所的な振幅の増大は、石狩湾新港周辺の深部地盤構造の 3 次元構造が影響していると考えられる。しかし、この地域の 3 次元速度構造の地震動への影響の検討のためには、特に地震動に影響の大きい S 波速度構造に関する探査がまだ十分とはいえないかった。

我々はこの地域の地震基盤までの S 波速度構造の解明を目的として、2005 年にこの地域の 3 サイトにおいて微動アレー観測を行った。微動アレー観測からレイリー波の位相速度を推定し、他の地下構造に関する資料と比較しながら地下構造を推定する。さらに、速度構造モデルの作成（例えば、吉田・他、2007）に寄与することを目的として、本研究と同様に石狩平野で微動アレー探査を行った笹谷・他（2001）や吉田・他（2009）の結果と本研究の結果を比較する。

II. 地質概説

観測サイトの地形図を Fig. 1 に示す。探査地域の北側には石狩丘陵が位置し、その南側には平坦な石狩平野が広がり、平野中央部を石狩川が北西に流れている。探査地域周辺の石狩川の流路の一部は人工改変により直線化され、元の流路が現在の茨戸川である。探査地域は、1/5 万地質

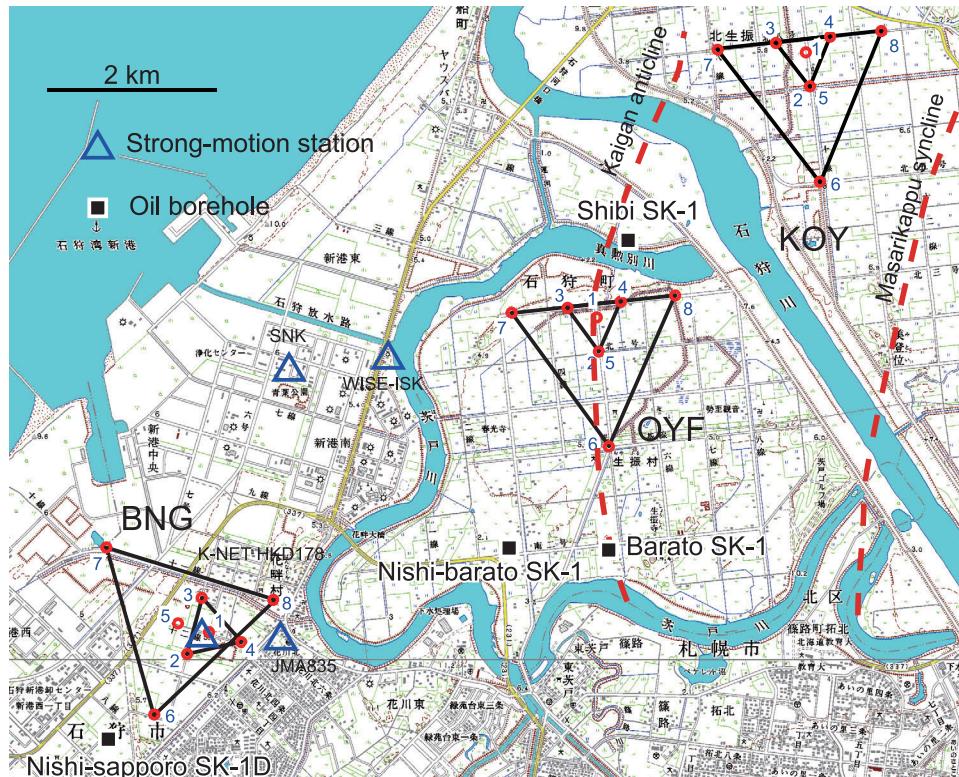


Fig. 1. The map showing the location of arrays. The base maps are 1/50000 topographic maps published by Geographical Survey Institute.

図「札幌」(小山内・他, 1956) と「石狩」(垣見, 1958) にまたがる。平野部の地形には明瞭な起伏は認められず、ほぼ平坦な地形であるが、地下の構造は起伏に富んでいることが知られている。例えば、石油探査などの結果から、探査地域中央部を背斜軸や向斜軸が南北に続くことが記されている（例えば、石田・曾谷, 1980）。

探査地域の地質は、前述の地質図に加え、全般的には加藤・他 (1990) が、主に第三系に関しては重川・他 (1990) が、第四系については岡 (1992, 2003, 2005), 岡・他 (1992), 嵐峨山・他 (2008) が参考になる。この地域では、石油探査などの目的で多くの物理探査が行われており、その一部が公にされている。また、この地域の第四系の地下構造は、岡 (2005) などによりボーリング柱状図などを用いて調べられている。これらの文献を参考に、層序を Table 1 にまとめた。

本研究では、地質を基にした地層境界を基準に解析を行うが、最終的に得られる速度構造は必ずしも地質構造とは対応しない。また、Table 1 からも明らかのように、地域・論文の年代などのさまざまな理由により地質名や地層境界が異なる場合がある。本稿では、文献を参照する際はそれぞれの文献による地層名あるいは地質時代を用い、微動の解析では、Table 1 に示した地層名あるいは Layer code を用いる。

Table 1. Stratigraphy on the explored area.

Geologic age		Formation				Layer code	Note
		Oka (1992)	Oka et al. (1992)	Omokawa et al. (1990)	Present study		
Holocene		Holocene deposits	Holocene deposits		Alluvium	A1	
Pleistocene	Late	Middle terrace deposits	Shikotsu pumice fall		Middle to late Pleistocene	UP	
	Middle	Dateyama formation	Nopporo formation	Shishinai formation			
	Early	Zaimokusawa formation	Uranosawa formation	Zaimokusawa formation	Zaimokusawa formation	LP	
Pliocene		Tobetsu formation	Tobetsu formation	Tobetsu formation	Tobetsu formation	PI	
Miocene	Late	Morai formation	Morai formation	Morai formation	Morai formation	LM	
	Middle			Ban'nosawa formation	Ban'nosawa formation	MM	1
				Atsuta formation	Atsuta formation		2
				Ponsubetsu formation	Ponsubetsu formation		
	Early				Green tuff	Bd	Seismic bedrock

III. 観測

微動の観測は 2005 年 5 ~ 7 月に行った。微動の測定には、データ収録装置に 24 ビット A/D 変換器を用いた白山工業(株) LS-7000 XT を使用し、地震計は Lennartz electronics 社 LE-3 D/5 s を用いた。観測では収録時間に応じ 50 あるいは 100 Hz サンプリングでデータを収録した。時計の校正はそれぞれの観測点において GPS により行い、全観測点で時刻同期の取れた記録を得た。

アレー形状には円周上の 3 観測点と中心 1 観測点の計 4 観測点からなるアレーを用いた。アレーの半径には、ほぼ同じ組合せを用いた (Table 2)。同時に 7 または 8 観測点で測定し、それぞれのアレー半径は、L アレーで約 1100 m, SL アレーで 800 m, M アレーで約 380 m, S アレーで 100 m, SS アレーで、30 m とした。

IV. 位相速度の推定

微動アレー観測により得られた微動記録から、微動に含まれる表面波（レイリー波）の位相速度を求めた。観測された微動記録にバンドパスフィルターを適用し、アレー半径に応じて 10.24~163.84 秒を 1 解析区間として波形を分割し、局所的なノイズなどの少ない安定した微動記録の得られた区間にに対して、空間自己相関法 (SPAC 法、例えば, Okada, 2003) を適用した。SPAC 法では、アレーの記録の解析により得られる空間自己相関係数 (SPAC 係数) $\rho(f, r)$ が、アレー半径 r , 周波数 f , 位相速度 $c(f)$ からなる量 $2\pi fr/c(f)$ を変数とする第一種 0 次ベッセ

Table 2. Details on the microtremor arrays.

Site	Array	Central location		Radius	Date	Time (JST)
		Latitude	Longitude			
KOY	SS	43. 2346	141. 3923	30 m	2005 May 31	15:53-16:57
	S	43. 2344	141. 3924	100 m	2005 May 31	16:08-16:56
	M	43. 2331	141. 3924	380 m	2005 May 31	13:14-15:22
	SL	43. 2312	141. 3926	800 m	2005 July 9	17:17-18:57
	L	43. 2297	141. 3929	1140 m	2005 May 31	12:57-15:21
OYF	SS	43. 1915	141. 3636	30 m	2005 June 1	15:10-16:10
	S	43. 1917	141. 3632	100 m	2005 June 1	15:10-16:20
	M	43. 2051	141. 3618	373 m	2005 June 1	12:24-14:29
	L	43. 2018	141. 3623	1120 m	2005 June 1	12:19-14:24
BNG	SS	43. 1714	141. 3080	30 m	2005 June 2	15:07-16:15
	S	43. 1717	141. 3081	100 m	2005 June 2	15:17-16:13
	M	43. 1718	141. 3056	365 m	2005 June 2	11:54-14:33
	SL	43. 1713	141. 3079	800 m	2005 July 9	14:12-16:12
	L	43. 1728	141. 3011	1130 m	2005 June 2	12:00-14:33

ル関数として理論的にあらわされること、すなわち、

$$\rho(f, r) = J_0(2\pi fr/c(f)) \quad (1)$$

であることを用いて、位相速度 $c(f)$ を推定する。

各アレーから推定された分散曲線が比較的安定して求められたと思われる部分を滑らかにつなぐようにして、最終的な位相速度とした。Figs. 2～4 に石狩平野北西部の 3 サイトにおいて得られた位相速度および SPAC 係数を示す。位相速度が得られた周波数範囲はサイトにより異なるものの、0.22 Hz から 4.32 Hz までの範囲であり、各サイトとも周波数が増加するにつれて位相速度は小さくなる分散性が見られる。

なお、OYF と BNG については、低周波数側（約 0.5 Hz 以下）で、ノイズなどの影響からか滑らかにつながらないなど、必ずしも妥当と考えられる位相速度が得られなかった帯域があった。しかし、位相速度が得られていない周波数帯よりもさらに低周波数側でそれが得られた場合は、解析に用いた。ただし、OYF の長周期側はやや信頼性に欠けることを VI 節で述べる。

V. 速度構造の推定

推定された分散曲線を説明するような S 波速度構造を、遺伝的アルゴリズム (GA; Yamanaka and Ishida, 1996) による逆解析により推定した。解析では各サイトごとに 1 次元水平成層構造を仮定し、P 波速度と密度は Ludwig et al. (1970) により S 波速度の関数として与えた。サイト

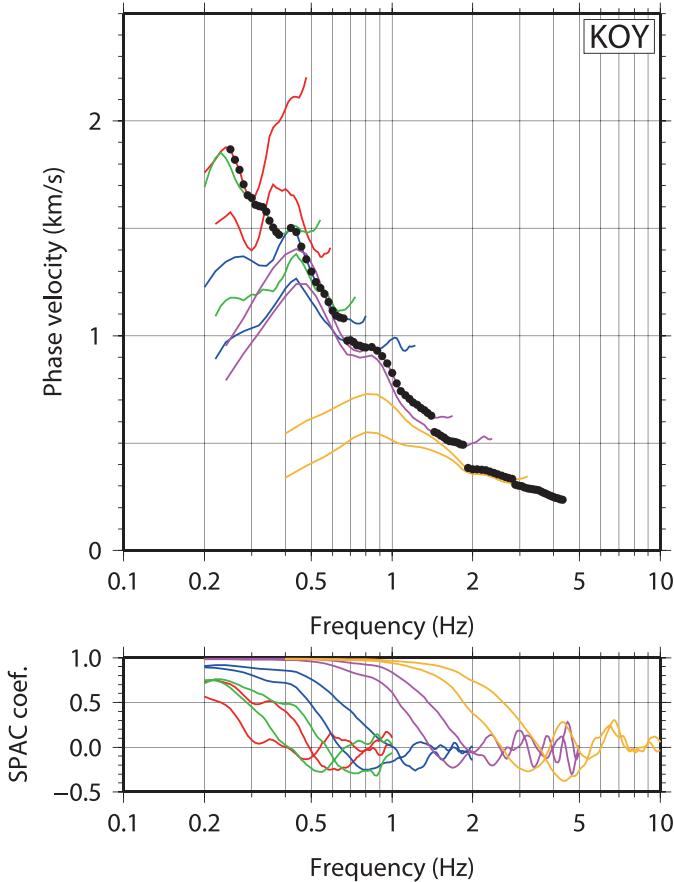


Fig. 2. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the microtremor records at KOY site. Solid curves are the phase velocities obtained from each array size. Different colors of the curves indicate the phase velocities obtained from different arrays. Solid circles are the phase velocities compiled from the phase velocities of various array sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.

毎に乱数を変えた10通りの試行により構造を推定した。なお、誤差の評価関数は、

$$misfit = \sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2 / N \quad (2)$$

とした。ここで、 O_i は観測により得られた位相速度、 C_i は構造から理論的に計算された位相速度、 N はデータの個数を表す。誤差の評価関数 $misfit$ が小さくなるような構造を探し、S波速度構造を推定した。

推定結果の評価の際には、 $misfit$ を元に解のばらつきも評価した。最終的に得られた構造を示す際に、 $misfit$ 最小の構造モデルに加え、GAによる探索の過程で計算された構造モデルのうち、 $misfit$ が最小のものの1.25倍までの構造モデルとそれから計算される分散曲線も同時に示した。このとき、 $misfit$ が大きくなるにつれ色が薄くなるようにした。山中・他（1999）は、ある $misfit$ 以下の値を平均したものを最終解としているが、本研究では最小の $misfit$ のモデルを

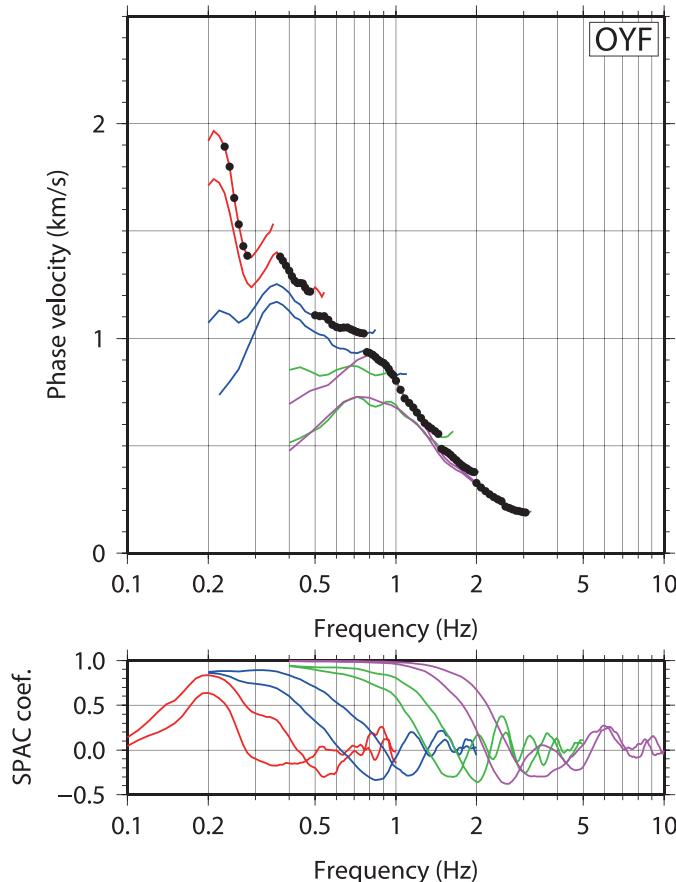


Fig. 3. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the microtremor records at OYF site. Solid curves are the phase velocities obtained from each array size. Different colors of the curves indicate the phase velocities obtained from different arrays. Solid circles are the phase velocities compiled from the phase velocities of various array sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.

最終解とした。また、ばらつきを同時に示すことで、各推定値の推定精度を知ることができる。

速度構造の推定では、それぞれのサイトで利用可能な他の探査データにより得られている層境界深度を参考に、層数と層厚の探索範囲を設定した。詳しくは各サイトの節で述べる。

1. KOY (北生振)

KOY では、サイト中心付近を石油探査のための反射法探査測線が通っている（石油公団, 1993)*。反射法探査では主に第三系を対象としており、石油公団 (1993) の解釈深度断面にはグリーンタフ～材木沢層の層境界深度が描かれている。逆解析では、この解釈深度断面から読み

* なお、石油公団 (1993) は入手がやや困難であるが、本稿で参照している解釈深度断面は吉田・他 (2009) に引用されている。

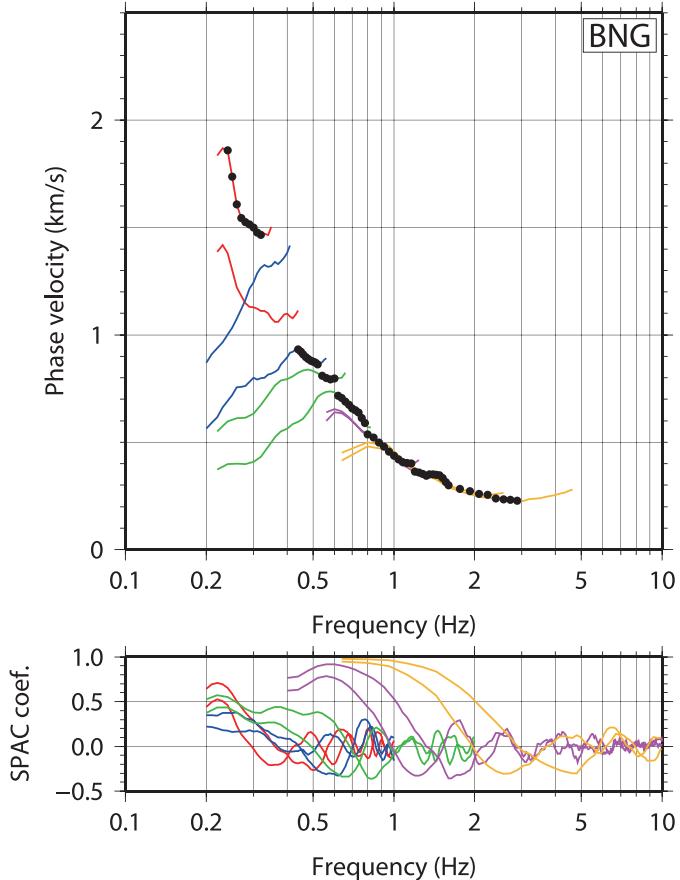


Fig. 4. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the microtremor records at BNG site. Solid curves are the phase velocities obtained from each array size. Different colors of the curves indicate the phase velocities obtained from different arrays. Solid circles are the phase velocities compiled from the phase velocities of various array sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.

取った当別層～奔須部都層の5層の層厚を元に層厚の探索範囲を狭く（数10m程度）設定し、S波速度の探索範囲を広く（0.4～2.3 km/s）に設定した。

この反射法の深度断面では第四系について触れられていないので、第四系については他の文献を探した。更新統の中位段丘堆積物（Middle terrace deposits）・伊達山層（Dateyama formation）・材木沢層（Zaimokusawa formation）の間の層境界深度に関する資料は見つからなかった。ここでは、位相速度の逆解析による分解能を考慮して、中位段丘堆積物と伊達山層を1層（Table 1のUP層）とし、UP層とLP層（材木沢層）との2層を設定した。伊達山層と材木沢層の境界面は、周辺の構造（例えば、岡・他, 1992）などから、深さ100m前後にあると仮定し、逆解析では層厚の探索範囲を±20mとした。

北海道地盤データベース（以降、地盤DB；地盤工学会北海道支部, 2003）には、このサイト周辺のボーリングによる地質柱状図がいくつか登録されている。これらの柱状図には、周辺のボーリ

リングなどの層相から沖積層の基底礫層と推測される礫層が深度 35~40 m に見られる。これから、このサイトでの沖積層厚の探索範囲を 35~40 m とした。

以上で設定した 8 層+基盤について逆解析を行ったところ、わずかな *misfit* の違いで深部の層の S 波速度が大きくばらつき、一部は極端な低速度層が現れる結果が得られた。そこで、最深部の 2 層（第 7 層と第 8 層；厚田層と奔須部都層に対応）を 1 層（MM 2 層）にまとめ、7 層+基盤として逆解析を行ったところ、ばらつきの少ない結果が得られた。最終的に得られた結果を Fig. 5 に示す。

2. OYF（生振）

この地域には茨戸油田があり、かつて実際に石油を採掘していたこともあって、地下構造探査は比較的豊富である。このサイトの南側には、石油ボーリングの茨戸 SK-1（北海道鉱業振興委員会、1968）や西茨戸 SK-1（石油公団、1995）などがあり、層境界深度が明らかにされている。また、第四系に関して岡（2005）が検討している。

茨戸油田周辺の地下構造図（北海道鉱業振興委員会、1968）によれば、この地域には茨戸背斜と呼ばれる南北に連続する背斜構造があり、茨戸 SK-1 は茨戸背斜の背斜構造が最も高まって

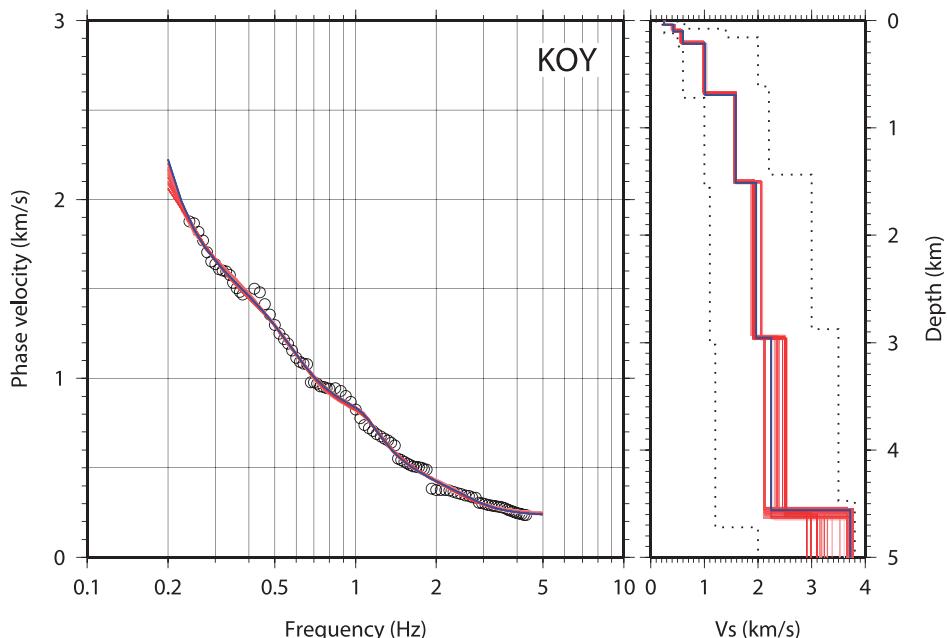


Fig. 5. The left panel shows comparison of the observed phase velocities (open circles) and theoretical phase velocities of the fundamental mode of Rayleigh wave calculated from the various velocity structure model at KOY site. The right panel shows velocity structure models. Blue lines indicate the phase velocities calculated from the best fit model and its velocity profile. Red lines show the estimated profiles within 1.25 times the minimum misfit value of the best profiles. Dotted lines in the right panel show a search range for the inversion.

いるところにある。西茨戸 SK-1 は茨戸 SK-1 の西側に位置し、茨戸背斜の裾野にあたる。OYF アレーの中心は、茨戸背斜の峰のほぼ北側延長にあり、最大アレー半径（約 1.3 km）は茨戸 SK-1 と西茨戸 SK-1 の間隔に近い。ここでは、アレーの広がりを考慮して、茨戸 SK-1 と西茨戸 SK-1 の層境界深度を 1:2 として逆解析に用いた。

更新統は、KOY と同様に、LP 層（材木沢層）と UP 層（伊達山層・中位段丘堆積物の層；岡（2005）の野幌層に相当）の 2 層とした。この 2 層の下限の深度は、岡（2005）によりそれぞれ約 200 m と 100 m とされており、この値を採用する。沖積層については、地盤 DB からサイト周辺のボーリングデータを参照し、深さ 40 m 付近に見られる礫層を沖積層の基底礫層と推定した。

以上で設定した 8 層+基盤からなる層の逆解析を行ったところ、わずかな *misfit* の変化で中部中新統にあたる下位 3 層の S 波速度が大きくばらつき、推定精度が極めて悪い結果が得られた。そこで、この 3 層を 1 層にまとめ、6 層+基盤で推定したところ、推定された構造のばらつきは小さく求められた。また、更新統の 2 層の推定結果がやはり大きくばらついたため、この 2 層もまとめて 1 層とし、結局 5 層+基盤として推定した。最終的に得られた S 波速度構造を Fig. 6 に示す。

3. BNG（花畔）

このサイトのすぐ西側には西札幌構造（背斜）と呼ばれる背斜構造が知られている（例えば北海道鉱業振興委員会、1990；岡、2005）。この背斜軸上に石油ボーリングの西札幌 SK-1 D が

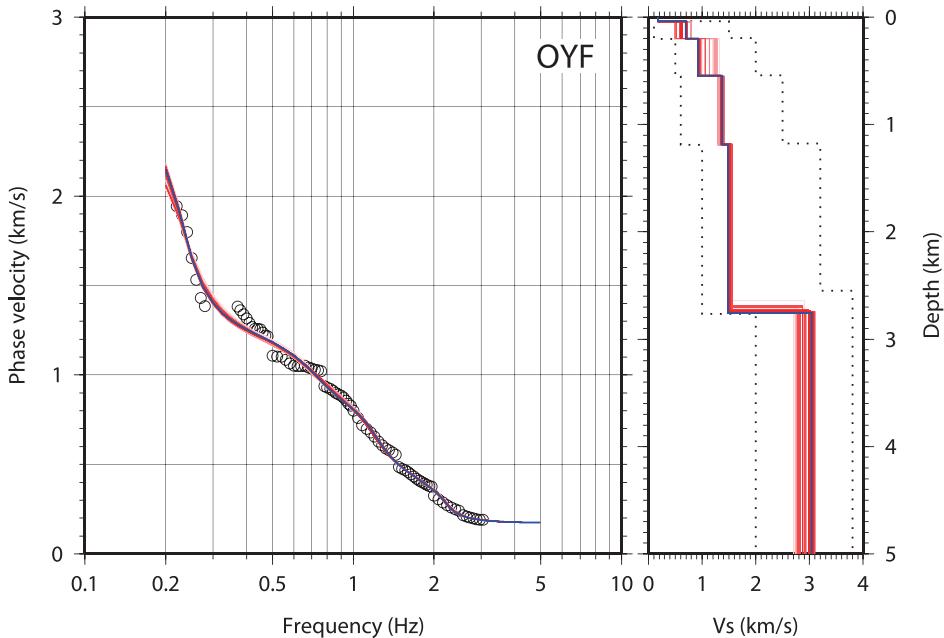


Fig. 6. The same as Fig. 5 for OYF site.

あり、反射法探査の結果とあわせて解釈した地下構造が北海道鉱業振興委員会(1990)などに示されている。このボーリングにおける材木沢層下限からグリーンタフ層の間の層境界深度は石油公団(1995)などに示されている。西札幌SK-1Dは、背斜軸の峰に位置すると考えられることから、このボーリングでの各層の層厚を下限として、層厚で5%以内の増加を層厚の探索範囲とした。

材木沢層よりも浅部では、まず材木沢層と野幌層(伊達山層および中位段丘堆積物に対応)の境界が岡(2005)の第16図から深度約150mと推定される。沖積層の下限は、地盤DBや嵯峨山・他(2008)により示されている周辺のボーリングから深度45~50mと推定される。

以上の8層+基盤からなる層の逆解析を行ったが、中部中新統にあたる下位の3層のばらつきが大きかったり、極端な低速度層が推定されるなどして、妥当な解が得られなかった。そこで、これらの3層を1層(MM層)としてまとめ、6層+基盤として逆解析を行った。得られたS波速度構造をFig.7に示す。

VI. 考 察

本研究での探査では、層境界深度を他の探査やボーリング情報などで与えることができたため、地層毎のS波速度が求められている。Table 3に今回の3サイトにおけるS波速度を地層ごとにまとめた。また、今回と同様に他の探査結果を元に層境界深度を決めた上で分散曲線からS波

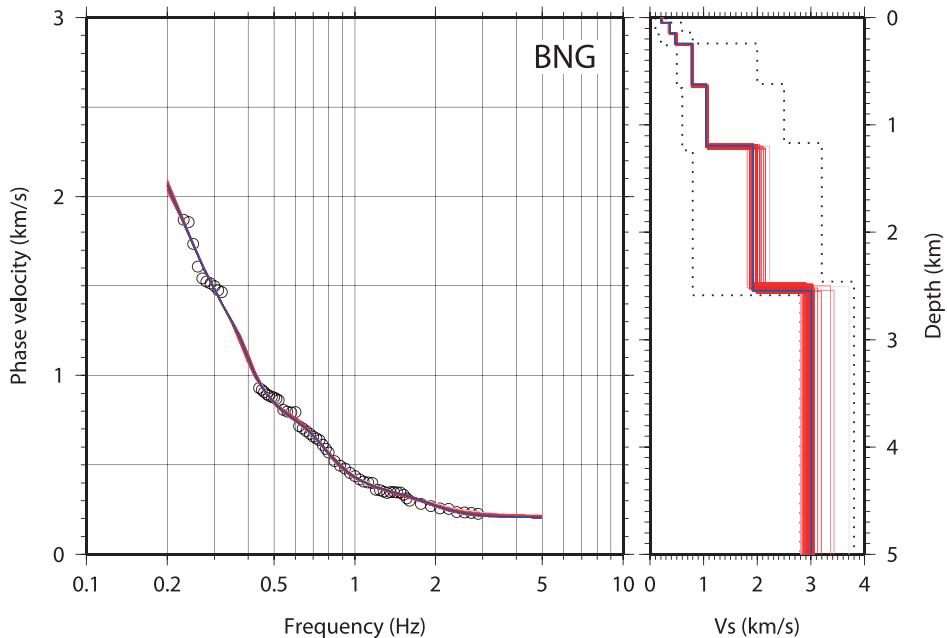


Fig. 7. The same as Fig. 5 for BNG site.

Table 3. Comparison of the estimated S-wave velocities in km/s. The S-wave velocities by Yoshida et al. (2009) are also shown.

Layer	Present study			Yoshida et al. (2009)		
	KOY	OYF	BNG	HGU	MHR	YHT
A1	0.244	0.181	0.216	0.131	0.043	0.056
UP	0.426	0.691	0.373	0.395	0.594	0.414
LP	0.598		0.463	0.969	1.013	1.292
Pl	1.016	0.922	0.781	1.431	1.520	
LM	1.581	1.372	1.045	1.575	2.266	2.069
MM	1 2	1.961 2.242	1.481 1.925	1.969	2.906	2.063
Bd	3.716	3.041	3.003	2.969	3.484	3.484

速度を求めた吉田・他 (2009) による結果も同時に示した。どの探査結果でも、対比される地層ではおおむね近い S 波速度を示すが、ある程度のばらつきを示す。ばらつきの傾向を見るため、各地層ごとに S 波速度を深さの関数としてグラフに描いた (Fig. 8)。ここでは、笛谷・他 (2001) の SNK の結果も図に加えた。S 波速度の推定精度が必ずしも良くないという問題は残るが、特に LP 層（下部更新統）より深い層で、深さとともに S 波速度が増加していることが明瞭に示されている。

OYF サイトは、岡田・他 (1987) による生振サイトとほぼ同じ地点での測定である。岡田・他 (1987) による位相速度と本研究による位相速度を比較した (Fig. 9)。両者は機材や観測期間が異なるにもかかわらず、0.4 Hz 以上では非常に良い一致を示し、この帯域では信頼性の高い位相速度が得られていると考えられる。一方、0.3 Hz 以下では本研究によるものほうが低い位相速度が得られている。本研究による OYF の L アレーの SPAC 係数 (Fig. 3 中の赤線) は、0.3 Hz 前後でやや不自然な屈曲が見られ、この周波数帯域で分散曲線も折れ曲がっている。本研究での測定では、大型車両による交通ノイズなどの影響を受けて SPAC 係数が低下し、本来より位相速度が低めに推定された可能性がある。この影響は MM 層の位相速度の推定に影響を与えている可能性があり、Table 3 でも OYF の MM 層は他の MM 層の推定値と比べかなり低い値を示している。しかし、比較的高周波数の位相速度により求められる LM 層（上部中新統）より浅い層では、他のサイトの値とも調和的であり、LM 層より深い層については妥当な S 波速度が求められていると考えられる。

VII. ま と め

2005 年に石狩平野北部の 3 サイトにおいて微動アレー観測を行い、空間自己相関法による解析で 0.22~4.32 Hz の分散曲線を得た。得られた分散曲線と、他の探査により得られている地層

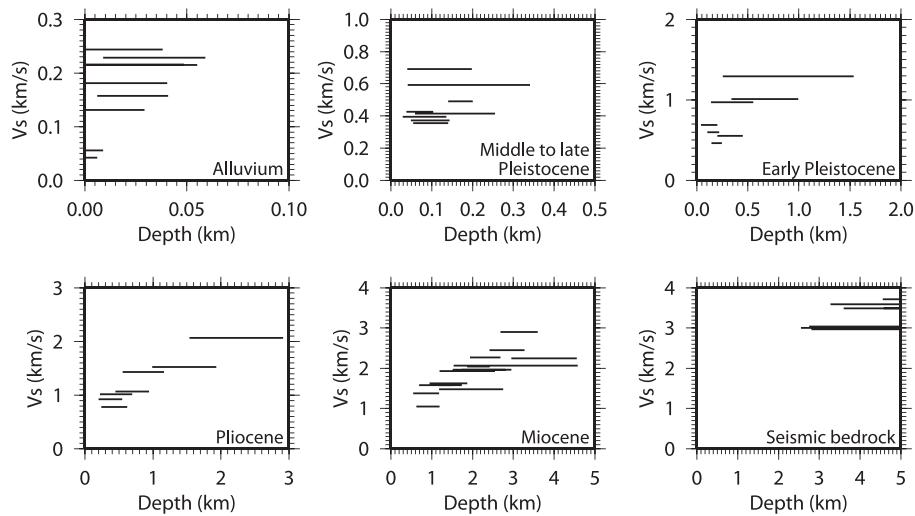


Fig. 8. Distribution of S-wave velocities as a function of depth. Solid line shows an S-wave velocity estimated from the SPAC analysis of the microtremor array records obtained in Ishikari plain by the present study, Sasatani et al. (2001) and Yoshida et al. (2009).

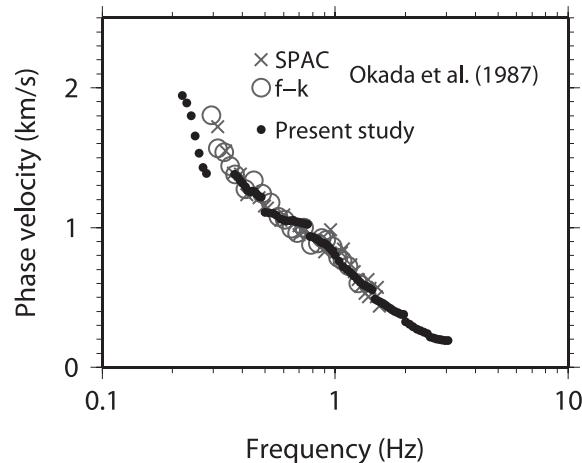


Fig. 9. Comparison of S-wave velocities at OYF site analyzed by the present study and Okada et al. (1987).

の層境界深度をもとに遺伝的アルゴリズムを用いて逆解析を行い、地震基盤までのS波速度構造を推定した。本研究で得られたS波速度構造を、他の研究による同じ石狩平野での微動アレー探査の結果を合わせて検討したところ、同じ地層内で明瞭な深さ依存性が見られた。

なお、本研究による観測結果は石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデル（吉田・他, 2007）に反映されている。ただし、本稿での位相速度や速度構造はその後に再解析を行ったものであり、

吉田・他 (2007) のものとは若干異なっていることを記しておく。

謝辞 本稿の執筆に当たっては、財地域地盤環境研究所の宮腰研博士に議論していただきました。石狩市役所には探査地域の詳細な地図を提供していただきました。観測に当たっては、近隣住民の皆様のご協力をいただきました。記して感謝します。

文 献

- 畠山 健・座間信作・西 晴樹・山田 實・廣川幹浩・井上涼介, 2004. 2003年十勝沖地震による周期数秒から數十秒の長周期地震動と石油タンクの被害, 地震 II, **57**, 83-103.
- 北海道鉱業振興委員会 (編), 1968. 北海道の石油・天然ガスの探査と開発, 北海道, 183 pp.
- 北海道鉱業振興委員会 (編), 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)一, 北海道, 157 pp.
- 石田正夫・曾谷龍典, 1980. 20 万分の 1 地質図幅「札幌」, 地質調査所.
- 地盤工学会北海道支部, 2003. 北海道地盤情報データベース Ver. 2003.
- 垣見俊弘, 1958.5 万分の 1 地質図幅「石狩」及び同説明書, 地質調査所, 47 pp.
- 加藤 誠・勝井義雄・北川芳男・松井 愈 (編), 1990. 日本の地質 1 北海道地方, 共立出版, 337 pp.
- Ludwig, W. J., J. E. Nafe and C. L. Drake, 1970. Seismic Refraction, in A. E. Maxwell ed., *The Sea*, 4, New York, Wiley Interscience, 53-84.
- 岡 孝雄, 1992. 石狩丘陵の上部新生界, 地下資源調査所報告, **63**, 109-135.
- 岡 孝雄, 2003. 流体資源ボーリングデータによる札幌市中心部とその北西地域の地下地質構造の解明, 平成 12~14 年度科学研究費補助金【地域連携推進研究費(2)】研究成果報告書 石狩低地帯北部の地震活動と活構造に関する研究 (研究代表者 笠原 稔, 研究課題番号 12792001), 73-148.
- 岡 孝雄, 2005. 流体資源ボーリングデータによる札幌市中心部とその北西地域の地下地質構造の解明一付, 札幌市などによる 6 地震探査断面の地質解釈一, 北海道立地質研究所報告, **76**, 1-54.
- 岡 孝雄・秋田藤夫・管 和哉・高見雅三, 1992. 江別市の地質と温泉資源, 江別市, 106 pp.
- Okada, H., 2003. *The microtremor survey method*, Geophysical monograph series, 12, Society of Exploration Geophysicists, 132 pp.
- 岡田 広・松島 健・日高英治, 1987. 長周期微動に含まれる表面波の位相速度推定法について—空間自己相關法と周波数一波数法の比較—, 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 53-62.
- 重川 守・近藤和也・早稲田 周, 1990. 北海道石狩北部地域の油・ガス田, 石油技術協会誌, **55**, 23-36.
- 小山内 熙・杉本良也・北川芳男, 1956. 5 万分の 1 地質図幅「札幌」および同説明書, 北海道地下資源調査所, 64 pp.
- 嵯峨山 積・山田悟郎・鈴木明彦・志賀健司・金川和人, 2008. 北海道石狩湾沿岸域の地震観測井における第四系の層序, 北海道立地質研究所報告, **79**, 9-13.
- 笛谷 努・吉田邦一・岡田 広・中野 修・小林稔明・凌 駿群, 2001. 札幌都市域における深部地下構造調査と強震動観測, 自然災害科学, **20**, 325-342.
- 石油公団, 1993. 平成 3 年度国内石油・天然ガス基礎調査陸上基礎物理探査「日高地域」調査報告書, 25 pp.
- 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, 118 pp.
- Yamanaka, H. and H. Ishida, 1996. Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface-Wave Dispersion Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 436-444.
- 中山浩明・佐藤浩章・栗田勝実・瀬尾和大, 1999. 関東平野南西部におけるやや長周期微動のアレイ観測—川崎市および横浜市の S 波速度構造の推定—, 地震 II, **51**, 355-365.
- 吉田邦一・笛谷 努, 2005. 石狩平野北西部における 2003 年十勝沖地震時の長周期地震動, 地震 II, **58**, 107-113.

- 吉田邦一・吉見雅行・鈴木晴彦・森野道夫・滝沢文教・関口春子・堀川晴央, 2007. 長周期地震動計算のための
石狩平野および勇払平野の3次元堆積盆地構造モデル, 活断層・古地震研究報告, 7, 1-29.
- 吉田邦一・堀川晴央・加瀬祐子・丸山 正, 2009. 石狩平野中央部における微動アレイ探査, 活断層・古地震研
究報告, 9, 1-17.