

## 石狩平野中央部における微動アレイ探査

### Microtremor array survey in the central part of the Ishikari plain

吉田邦一<sup>1</sup>・堀川晴央<sup>2</sup>・加瀬祐子<sup>2</sup>・丸山 正<sup>2</sup>

Kunikazu Yoshida<sup>1</sup>, Haruo Horikawa<sup>2</sup>, Yuko Kase<sup>2</sup> and Tadashi Maruyama<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 活断層研究センター, 現在 (財) 地域地盤環境研究所 (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault Research Center; Now at Geo-Research Institute, yoshida@geor.or.jp)

<sup>2</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, GSJ, Active Fault and Earthquake Research Center)

**Abstract:** S-wave velocity structures were explored in the central part of the Ishikari plain from microtremor array measurements. Phase velocities in a frequency range of 0.22-6.88 Hz were estimated using SPAC (SPatial AutoCorrelation) analysis of the microtremor records obtained at 4 sites. The S-wave velocity structure was inverted from the phase velocities by using a genetic algorithm technique. The inverted velocity structures consist with the deep borehole and seismic reflection surveys near the microtremor array sites. The observed phase velocities at 2 sites do not agree with the theoretical phase velocities calculated from the AFRC/GSJ 3D velocity model of the Ishikari and Yūfutsu plains, although at other 2 sites the observed and theoretical phase velocities agree. The 3D model might be modified around the 2 sites where the phase velocities do not agree.

**キーワード:** 微動アレイ探査, 石狩平野, S波速度構造, SPAC法

**Keywords:** microtremor array survey, Ishikari plain, S-wave velocity structure, SPAC method

#### 1. はじめに

石狩平野や勇払平野では, 2003年十勝沖地震以前より長周期地震動が卓越することが知られていた (Sasatani, 1990; 笹谷ほか, 2001). 2003年十勝沖地震の際には, 石狩平野や勇払平野で長周期地震動が卓越し (吉田・笹谷, 2005), 勇払平野で石油タンクに被害が発生したことから, 特に勇払平野の地震動特性について注目が集まり, 地震動シミュレーションを目的とした地下構造モデルが作成された (森川ほか, 2007). さらに, 吉田ほか (2007) は, 石狩平野についても大幅にデータを追加した地下構造モデルを作成した.

さて, これらの地下構造モデルは, 既存の探査データを収集して作成されているが, 探査には粗密があり, これがそのままモデルの品質を左右している. とりわけ, 強震動予測に重要なS波速度の探査は, 札幌市域と苫小牧周辺に偏っており, その他の地域では非常に少ない. 札幌東部・江別市・当別町にまたがる地域には明瞭な低重力異常域があり, ボーリングなどにより第四紀の下限が深さ1000m以上であることが知られている. 岡 (1992) などにより「札幌東部-当別沈降域」と呼ばれているこの領域では, 重力異常などから基盤深度が大きく変化していると考えられるものの, S波速度の探査は不足している. この領域は石狩平野の中央部に当たることから, この領域のモデルの品質は石狩平野全体の地震動シ

ミュレーション結果に対する影響が大きいと考えられる. そこで我々は, S波速度構造の探査が不足している札幌東部-当別沈降域とその周辺において微動アレイ探査を行った.

#### 2. 地形・地質

探査地域は石狩平野の中央部に位置し, 南北を野幌丘陵と石狩丘陵に挟まれた概ね標高10m以下の低地である (第1図). この地域では石狩川が南下から北上へU字型に向きを大きく変える.

探査地域は, 1/5万地質図「札幌」(小山内ほか, 1956), 「江別」(松下, 1971), 「石狩」(垣見, 1958), 「当別」(垣見・植村, 1956) にまたがる. 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. この地域の第四系の地下構造は, ボーリングや反射法探査によりある程度調べられており, その一部は江別市 (1992) などにまとめられている.

探査地域の北側に位置する石狩丘陵には当別断層が, 南側に位置する野幌丘陵には野幌断層が知られている (産業技術総合研究所, 2009). 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 (例えば江別市, 1992). 石油探査などの結果から, 探査地域東側のHGUサイト付近では基盤が比較的浅い (金沢背斜) が, 西側のSTGやYHTサ

イト付近では深い（札幌東部－当別沈降域）ことが知られている（例えば岡，1992）．これを反映して，探査地域では，顕著な重力異常が認められ，西部では明瞭な低重力異常を示すのに対し，東部では高重力異常を示す（第1図）．

探査地域の地質は，江別市（1992），石油公団（1993），岡（1978，1986，1992），岡ほか（1991），吉田ほか（2007）などで解説されている．これらの文献を参考に，層序を第1表にまとめた．この地域では，グリーンタフ（緑色凝灰岩）層あるいは隈根尻層群を基盤とみなすことができる．この基盤よりも上位の層（奔須部都層およびそれより上位の層）を探査の対象とする．なお，文献により北側の石狩丘陵と南側の野幌丘陵とで，同時代の地層でも名称が異なる．本稿では主に石狩丘陵の地層名を用いるが，参考文献と対比しやすいよう必要に応じ野幌丘陵側の地層名も用いた．

### 3. 微動アレイ観測・データ

微動の観測は2007年から2009年にかけて実施した（第2表）．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-7000XTを使用し，地震計には2007年の測定では（株）東京測振VSE-15D1を，2008，2009年の測定ではVSE-15D1の改良型であるVSE-15D6を使用した（第2，3図）．使用した地震計の振幅特性は，VSE-15D1，VSE-15D6ともに0.1～70 Hzでほぼ平坦であるが，VSE-15D6はVSE-15D1と比べ内部ノイズが少なく，特に微動レベルの低い低周波数側での微動の測定に有利である．いずれの観測でも上下動成分のみを対象として，100あるいは200 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．

2007年の観測では，0.5 Hz以上の周波数帯域で概ね良好な記録が得られた．しかし，観測時期が微動レベルの低い季節であり，VSE-15D1の特性と相まって，低周波数側では十分なS/N比で記録が得られなかった．このため，0.4 Hz以下の低周波数帯域で適切な位相速度は得られなかった．そこで，2008年，2009年にはVSE-15D6を使用し，微動レベルが高くなると想定される時期に，低周波数側を対象とした大半径アレイのみを再度測定した．

アレイ形状には円周上の3観測点と中心の4観測点からなるアレイを用いた．アレイの半径には，一部の例外を除き，同じ組合せを用いた（第2表）．同時に7または8観測点で測定し，それぞれのアレイ半径は，Lアレイで約1200 mおよび約600 m，Sアレイで，約240 mおよび80 m，Nアレイで，30 mおよび10 mとした．2008，2009年のLアレイの再測定では，半径約1200 mの4観測点（円周上の3観測

点と中心1観測点）のみを行った．このときのアレイをL2アレイと呼ぶことにする．また，MHRでは2007年の測定結果から極小アレイによる高周波数側での測定が必要なことが判ったため，半径2 mのPアレイの測定も行った．

2007年，2008年の観測では地震計を地表に設置して測定した．一方，2009年のYHTのL2アレイの観測では，積雪時の観測となった（第3図）．設置に際しては，地面あるいは硬く締まりほぼ氷となっているところまで雪を掘り，そこに地震計を設置した．その後，雪を埋め戻し，測定を行った．なお，アレイ観測終了の後，ハドルテストを実施し，コヒーレンスなどを計算した（第4図）．ハドルテストでは，アレイ観測の時と同じように雪穴を掘り，その中に地震計を埋設した．0.2～10 Hzでの解析結果は非常に良好なコヒーレンスを示している．詳細な検討は必要であるが，雪中への埋設は良好な結果となる可能性が示唆される．

### 4. 位相速度の推定

微動アレイ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，アレイ半径に応じて10.24～81.92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，アレイ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，アレイ半径 $r$ ，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．

各アレイ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．第5～8図に石狩平野中央部の4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～6.88 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，MHRでは，微動レベルが低かったことも影響して，L2アレイとSアレイの間に当たるLアレイを用いて適切な位相速度を推定できなかった．このため，0.4～0.6 Hzの位相速度は求められていない．

推定された位相速度は，4サイトとも高周波数側（おおむね3 Hz以上）で0.1 km/s以下を示している．また，1 Hz以下では，HGUのみが他のサイトと異なる分散曲線を示し，それ以外の3サイトでは同じような分散曲線が得られた（第9図）．

## 5. S波速度構造の推定

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、 $C_i$  は構造モデル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モデルを探し、S波速度構造を推定した。

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。この地域では石油探査が行われており、STGを除く各サイトで、おおむね新第三系以深について石油公団 (1993) や齊藤・小椋 (1994) などに反射法やボーリングなどによる構造探査の結果が示されている。第四系に関しては、水井戸などから得られている地質柱状図や地層境界深度の情報を最大限集め、参考にした。詳しくは、各サイトの節で述べる。

### 5.1 HGU

HGUは、アレイ中心部に石油資源開発の南金沢SK-1ボーリングがあり、新第三系の地層境界の深さが明らかにされている (たとえば、北海道鉱業振興委員会, 1990)。しかし、第四系については特に記載がなされていない。南金沢SK-1の北側にある金沢SK-1 (第1図参照) では地層区分を行っており、第四系に関連する層として上位より沖積層 (0~19 m)、洪積層 (19~135 m)、滝川層 (135~691 m) が記載されている (北海道鉱業振興委員会, 1968)。HGUでの完新世堆積物の下限の深さは、金沢SK-1の沖積層下限の深度や周辺のボーリング柱状図などから15~30 m程度で、 $V_s$  は高周波数側の位相速度から0.1 km/s程度であることが想定される。また、江別市 (1992) によれば、金沢SK-1の地層区分のうち、滝川層がほぼ材木沢層・当別層上部に相当することから、「洪積層」が中位段丘堆積物・更新世中期伊達山層に対応すると考えられる。そこで、深さ135 m前後に伊達山層と鮮新世末期~更新世前期の材木沢層の境界を設定した (第1表)。材木沢層より深い部分については南金沢SK-1ボーリングの柱状図 (北海道鉱業振興委員会, 1990) より、材木沢層の下限の深さを約535 m、基盤の隈根尻層群の深さを約2900 mとした。

層厚の探索幅は、層厚の設定に参考にした資料の不確かさ程度 (層によって数m~200 m程度) の幅に設定した。比較的狭い探索幅となった層厚に対し、 $V_s$  の探索幅は、地層の年代や深さから予想される $V_s$  を中心に、探索幅が結果を規制しないよう十分広め (層により200 m/s~2000 m/s程度) に設定した。以上のように設定した層境界深度を参考に6層 (+基盤) 構造を仮定し、GAによる探索を行った。ここで仮定した6層+基盤の内訳は、下位より基盤、中新世中期、中新世後期、鮮新世、更新世前期、更新世中・後期、完新世の各層に対応する (第1表)。推定した速度構造と設定した探索範囲を第10図に示す。

### 5.2 MHR

MHRでは、深部構造に関しては、反射法による時間断面 (齊藤・小椋, 1994) や、地質解釈断面 (石油公団, 1993) がアレイを南北に通っている。また、ごく表層に関しては、浅層ボーリングの結果をもとに層境界が示されている (松下, 1971; 嵯峨山ほか, 2008)。これらの資料によれば、完新世堆積物 (いわゆる沖積層) の層厚が40~50 mで、そのうち表層7 m前後が泥炭層からなる。MHRでは3 Hzでの位相速度が約70 m/s、5 Hz以上で約30 m/sと遅く、軟弱な泥炭層の低いS波速度が反映されていると考えられる。更新世後期の野幌層群の基底の深さを、齊藤・小椋 (1994) の反射断面からおおむね350 mと推測し、それより深部を更新世前期の材木沢層として取り扱った。材木沢層の基底 (第四系の基底) 以深は、石油公団 (1993) による速度断面を元に層境界の深度を設定した。

設定した層境界深度を参考に、泥炭層を含めた7層構造 (+基盤) を仮定して、HGU同様に、層厚の探索幅は小さく、 $V_s$  の探索幅を広めに設定してGAによる探索を行った。推定した速度構造と探索範囲を第11図に示す。

### 5.3 YHT

YHTについても、深部構造は、反射法探査の結果などを参考にすると推定される地質解釈断面 (石油公団, 1993) がアレイの北側を東西に通っている。これによれば、グリーンタフ基盤の深度がおおむね3400 m、材木沢層の下限が約1500 mである。表層付近の構造については、岡 (1978) などを参考に、完新世堆積物の層厚を40~50 mとした。さらに、3 Hz付近の位相速度が75 m/s前後と非常に遅いことから、MHRと同様に層厚8 m前後の泥炭層を設定した。一方、鮮新世 (当別層) と中新世後期 (望来層) の2層を別々に推定すると、GAによる推定結果が安定しなかったため、逆解析ではこれらの2層を1層として取り扱った。

HGUやMHRと同様に、6層 (+基盤) を仮定し

てGAによる探索を行い、速度構造を推定した。推定した速度構造と探索範囲を第12図に示す。

#### 5.4 STG

STG周辺では、ボーリング等のデータをもとに材木沢層の下限の深度が明らかにされている(江別市, 1992)ものの、それ以外の構造に関する情報はほとんどない。STGの2~3 km西側の札幌市内では、反射法や微動探査が行われている(札幌市, 2003)が、重力異常などから構造は東西方向の変化が大きいことが予想されることから、札幌市内の探査による層境界の深さは参考程度にとどめるべきである。ここでは、HGU, MHR, YHTで推定された各層の $V_s$ のばらつき程度を $V_s$ の探索範囲として、STG以外のサイトでの $V_s$ の探索範囲よりも狭い探索範囲を設定した。層境界の深さの探索範囲は広く設定し、泥炭層を仮定せず、5層(+基盤)構造として速度構造の推定を行った。推定した速度構造と探索範囲を第13図に示す。

#### 5.5 推定された速度構造

GAによるS波速度の探索の結果(第10~13図)には、misfitが最小の解だけではなく、探索結果のうちmisfitが最小のもの1.25倍までのものを同時に示した。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。山中ほか(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。

ばらつきから、いずれのサイトでも、少なくとも深さ1000 m程度までは精度よく速度構造が推定されていることが示される。また、深部に行くに従いばらつきが大きくなる傾向が見られる。

#### 6. 議論

各サイトの位相速度を比較(第9図)すると、HGUが他の3サイトと比べ全体にやや高い位相速度を示す。MHR, STG, YHTの3サイトは、0.5~2 Hzの間で同じような位相速度を示す。第14図に、石油公団(1993)による反射法探査などをもとにしたと推定される地質断面と、本研究の微動探査による速度構造を比較したものを示す。HGU付近は金沢背斜と呼ばれる背斜構造であり(石油公団, 1993)、このために全体にやや高い位相速度を示すと考えられる。

各層で推定されたS波速度を比較する(第3表)。STGでは他の探査による拘束条件がないため、比較対象とはならないが、残りの3サイトでは、地質とS波速度を対比できる。推定されたS波速度は、比較的精度よく推定されている前期更新世~前期中新

世の層において同じような値となっている。石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデル(吉田ほか, 2007)による値と比較すると、本研究で推定されたS波速度は全体にやや高めである。

石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデル(吉田ほか, 2007)から観測サイトに対応する地点の速度構造を抜き出し、1次元構造としてレイリー波の位相速度を理論的に計算して、微動探査から推定された位相速度と比較した(第10~13図)。第10~13図では、計算した理論位相速度を灰色で示した。この3次元地盤構造モデルは、やや長周期(おおむね周期数秒以上)の地震波を対象に作成されているので、比較は周期数秒以上について行う。HGUでは観測された位相速度は理論値に比べ若干遅いが、その差は小さい。また、MHRでは、理論位相速度はほぼ観測位相速度を再現している。一方、STGとYHTでは理論と観測の位相速度は大きく異なっており、逆解析による速度構造モデルと地盤構造モデルも大きく食い違っている。少なくともSTGとYHTの周辺に関しては、本研究による結果を踏まえて地盤構造モデルを修正する必要がある。

#### 7. まとめ

石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデルを作成した際に、探査情報が不足していた石狩平野中央部において、S波速度構造の把握のために、微動アレイ探査を行った。石油探査のボーリングや反射法などによる地質断面の近くに3サイトと、そこから少し離れた所に1サイトの計4サイトで微動アレイ観測を行った。得られた微動アレイ記録から、空間自己相関法により0.22~6.88 Hzで位相速度を推定した。この位相速度をもとにGAによりS波速度構造を推定した。

推定された位相速度と速度構造を3次元地盤構造モデルの該当する地点のそれらと比較したところ、東側の2サイトについてはおおむね一致する結果が得られた。しかし、西側の2サイトについては、位相速度、速度構造ともに大きく異なっていた。今後、この観測結果をもとに3次元地盤構造モデルを修正する必要がある。

**謝辞** 観測にあたり、地元住民の方々には敷地の一部を観測に使用させていただきました。また、観測に当たっては、(株)東京測振との共同研究により機材の便宜などを図っていただきました。共同研究の推進に当たっては、産学官連携部門の古宇田亮一氏にご尽力いただきました。第14図は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構に転載を快諾していただきました。記して感謝します。本研究の費用の一部は経済産業省中小企業支援型研究開発制度の「小型・可搬型長周期微動計の性能評価」課題によりました。

## 文 献

- 地質調査総合センター（編）（2004）日本重力CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター, 第2版.
- 江別市（1992）江別市の地質と温泉資源, 江別市, 106 p.
- 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 p.
- 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）—, 北海道, 157 p.
- 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.
- 垣見俊弘・植村 武（1956）5万分の1地質図幅「当別」及び同説明書, 地質調査所, 17 p.
- Ludwig, W. J., Nafe, J. E. and Drake, C. L. (1970) Seismic refraction, in A. E. Maxwell ed., *The Sea*, 4, New York, Wiley Interscience, 53-84.
- 松下勝秀（1971）5万分の1地質図幅「江別」及び同説明書, 北海道立地下資源調査所, 26 p.
- 森川信之・藤原広行・河合伸一・青井 真・功刀 卓・石井 透・早川 譲・本多 亮・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子（2007）2003年十勝沖地震の観測記録を用いた強震動予測手法の検証, 防災科学技術研究所研究資料, No. 303, 防災科学技術研究所.
- 岡 孝雄（1978）“厚別低地帯”北方地域の地下地質, 地下資源調査所報告, 50, 81-107.
- 岡 孝雄（1986）北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス, 地団研専報, 31, 295-320.
- 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・興水達司・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.
- Okada, H. (2003) The microtremor survey method, geophysical monograph series, 12, Society of Exploration Geophysicists, 132.
- 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 p.
- 嵯峨山 積・田中洋行・西田浩太（2008）北海道石狩低地帯北部に存在した約6千年前の潟湖の証拠, 北海道立地質研究所報告, 79, 1-7.
- 斉藤雄一・小椋伸幸（1994）石狩平野北部地域新第三系のシーケンス層序, 石油技術協会誌, 59, 30-42.
- 産業技術総合研究所（2009）活断層データベース2009年7月23日版, 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB095, 産業技術総合研究所. <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>.
- 札幌市（2003）平成14年度地震関係基礎調査交付金石狩平野北部地下構造調査成果報告書, 291 p.
- Sasatani, T. (1990) Strong ground motions from intermediate-depth earthquakes: A study of site effects, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser VII (Geophysics)*, 8, 449-464.
- 笹谷 努・吉田邦一・岡田 広・中野 修・小林稔明・凌 甦群（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, No. 3, 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 p.
- 山中浩明・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2, 51, 355-365.
- Yamanaka, H. and Ishida, H. (1996) Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 436-444.
- 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, No. 7, 1-29.
- 吉田邦一・笹谷 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2, 58, 107-113.

(受付：2009年7月31日, 受理：2009年8月18日)

第1表. 探査地域の地質層序.

Table 1. Stratigraphy on the explored area.

地質時代		地層名		補足
		石狩丘陵	野幌丘陵	
第四紀	完新世	完新世堆積物	泥炭層	いわゆる沖積層
	更新世	後期	中位段丘堆積物	
		中期	伊達山層	
		前期	材木沢層	
新第三紀	鮮新世	当別層		金沢SK-1での洪積層 (本文参照) 金沢SK-1での滝の上層 (本文参照)
	中新世	後期	望来層	
		中期	盤の沢層	
			厚田層	
		前期	奔須部都層	
白亜紀		グリーンタフ	地震基盤	
		隈根尻層群		

第2表. 展開した微動アレイの詳細.

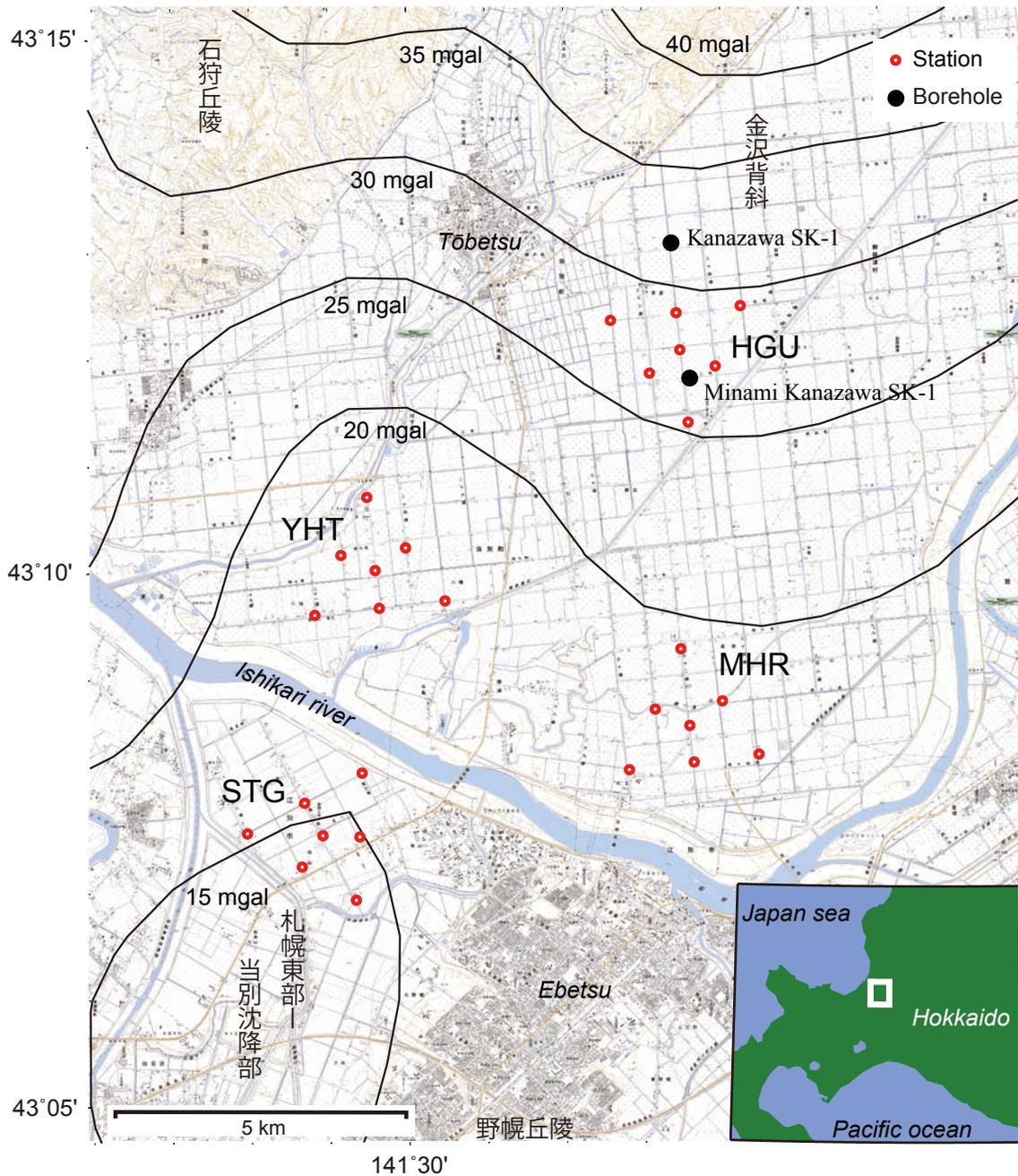
Table 2. Details on the microtremor arrays.

Site	Array	Central location		Radius	Date	Time
		Latitude	Longitude			
HGU	N	43.2021	141.5581	10, 30 m	2007 Jul. 24	15:01-15:25
	S	43.2017	141.5579	80, 240 m	2007 Jul. 23	17:30-19:30
	L	43.2013	141.5579	660 m	2007 Jul. 24	11:10-14:10
	L2	43.2013	141.5579	1260 m	2008 Oct. 15	15:35-18:30
MHR	P	43.1510	141.5582	2 m	2008 Oct. 14	17:50-18:00
	N	43.1509	141.5583	10, 30 m	2007 Jul. 27	15:30-16:10
	S	43.1409	141.5594	80, 240 m	2007 Jul. 26	16:50-18:00
	L	43.1427	141.5596	660 m	2007 Jul. 27	11:10-14:30
	L2	43.1427	141.5596	1310 m	2008 Oct. 15	10:45-13:40
YHT	N	43.1662	141.4932	10, 30 m	2007 Jul. 26	14:50-15:20
	S	43.1662	141.4927	80, 240 m	2007 Jul. 25	17:00-18:00
	L	43.1678	141.4931	600 m	2007 Jul. 26	11:00-14:15
	L2	43.1678	141.4931	1290 m	2009 Feb. 23	15:30-19:15
STG	N	43.1264	141.4814	12, 36 m	2007 Jul. 25	15:05-15:40
	S	43.1311	141.4777	80, 240 m	2007 Jul. 24	17:20-19:00
	L	43.1256	141.4817	600 m	2007 Jul. 25	11:30-14:00
	L2	43.1256	141.4817	1250 m	2008 Oct. 16	16:05-19:10

第3表. 推定されたS波速度(km/s)の比較. 石狩平野・勇払平野3次元地盤構造モデル(吉田ほか, 2007)によるS波速度も比較した.

Table 3. Comparison of the estimated S-wave velocities in km/s. The S-wave velocities in the AFRC/GSJ 3D velocity model of the Ishikari and Yūfutsu plains by Yoshida *et al.* (2007) are also shown.

Layer	HGU	MHR	STG	YHT	Yoshida <i>et al.</i> (2007)
Holocene	Uppermost	0.131	0.043	0.114	0.056
			0.158		0.400
Pleistocene	Upper	0.395	0.594	0.401	0.414
	Lower	0.969	1.01	1.10	1.29
Pliocene		1.43	1.52	1.53	2.07
Upper Miocene		1.58	2.27		1.73
Middle Miocene		1.97	2.91	2.05	2.06
Bedrocks		2.97	3.48	3.49	3.48
					3.13



第1図. アレイの位置. 基図は国土地理院 1/25000 地形図「太美」・「当別」・「札幌東北部」・「江別」.  
等値線は 5 mgal 毎のブーゲー異常 (地質調査総合センター, 2004) を示す.

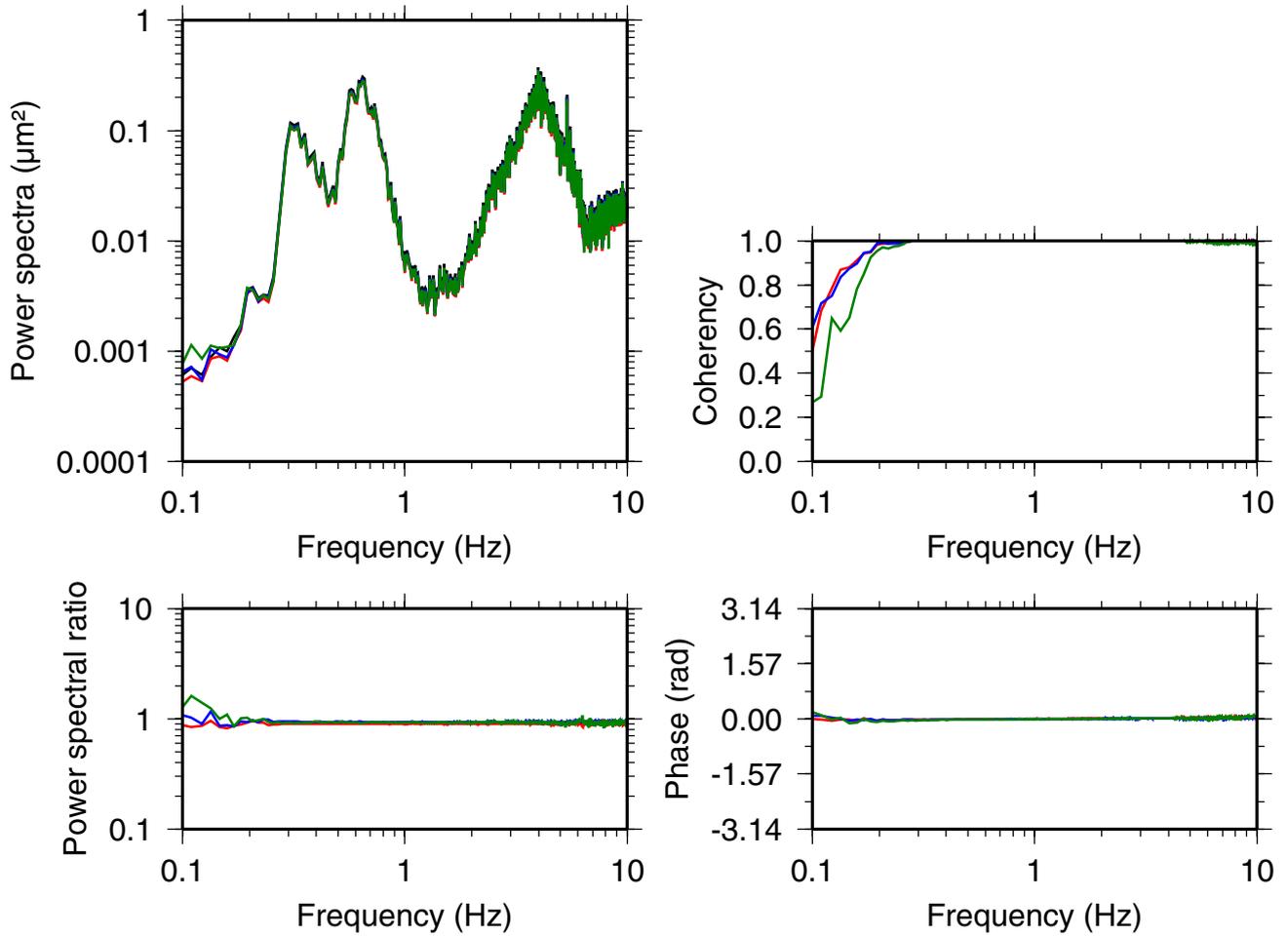
Fig. 1. The map showing the location of arrays. The base maps are 1/25000 topographic map "Futomi",  
"Tobetsu", "Sapporo Tōhokubu" and "Ebetsu". The contour interval of the Bouguer anomaly  
(Geological Survey of Japan, 2004) is 5 mgal.



第2図. 観測装置の例 (2007年の観測).  
Fig. 2. The instruments for microtremor observation conducted in 2007.

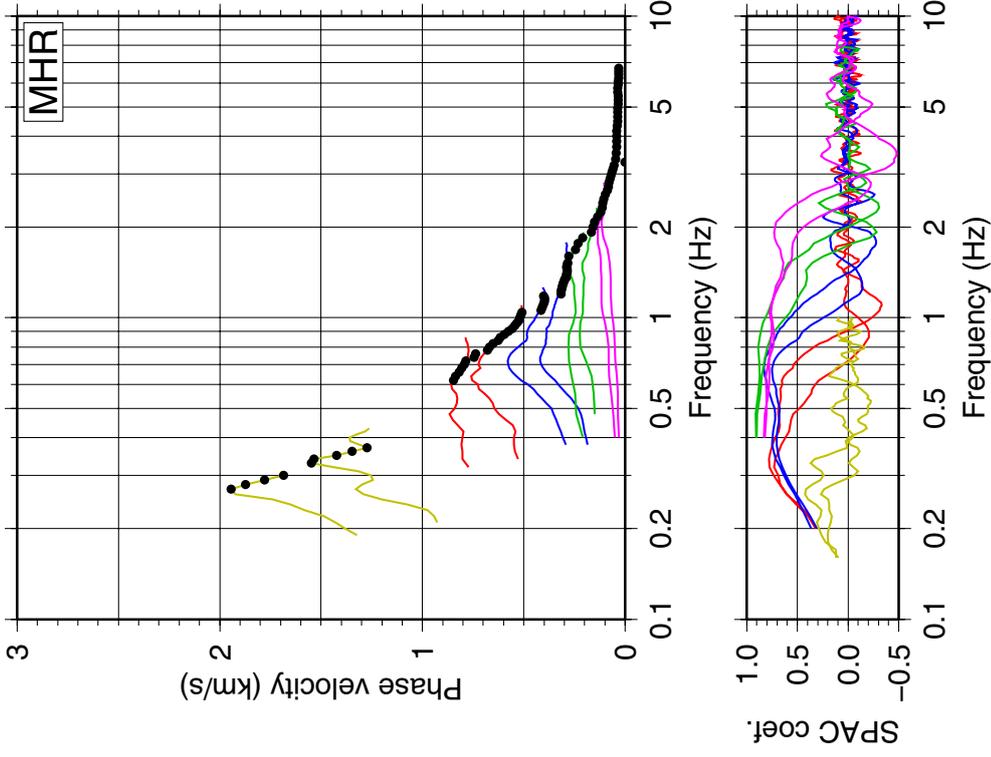


第3図. 観測装置の例 (2009年の観測).  
Fig. 3. The instruments for microtremor observation conducted in 2009.



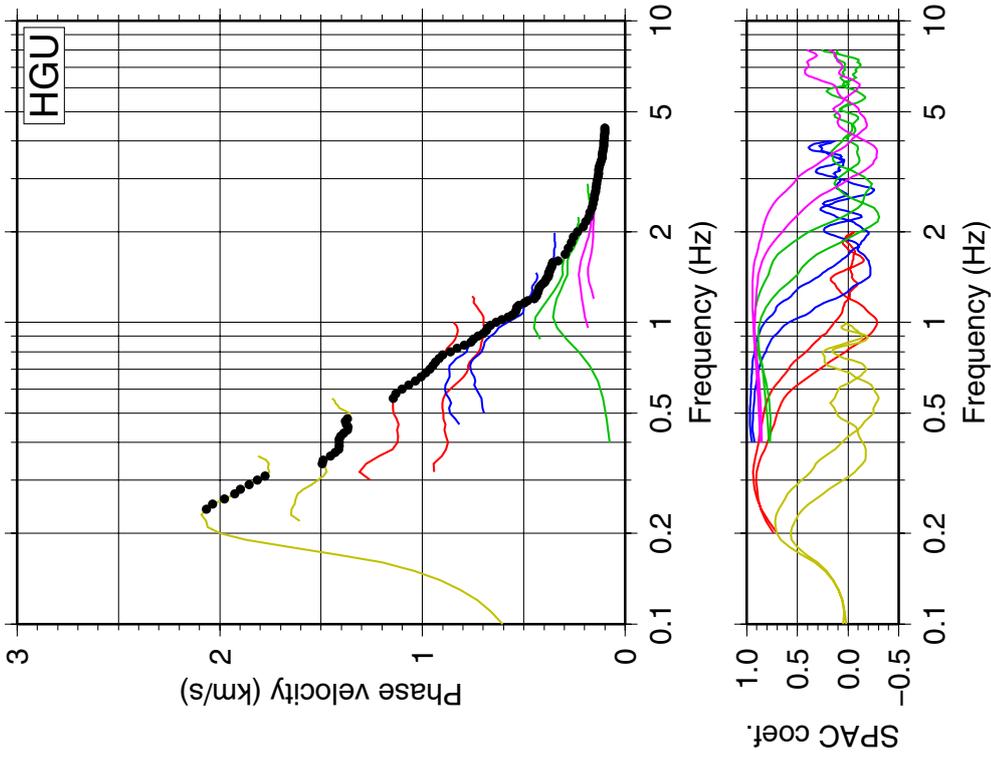
第4図. 2009年の観測終了後に行ったハドルテストによるパワースペクトル、パワースペクトル比、コヒーレンスおよび位相。

Fig. 4. The power spectra, power spectral ratios, coherences and phases that were derived from the huddle test after the microtremor observation conducted in 2009.



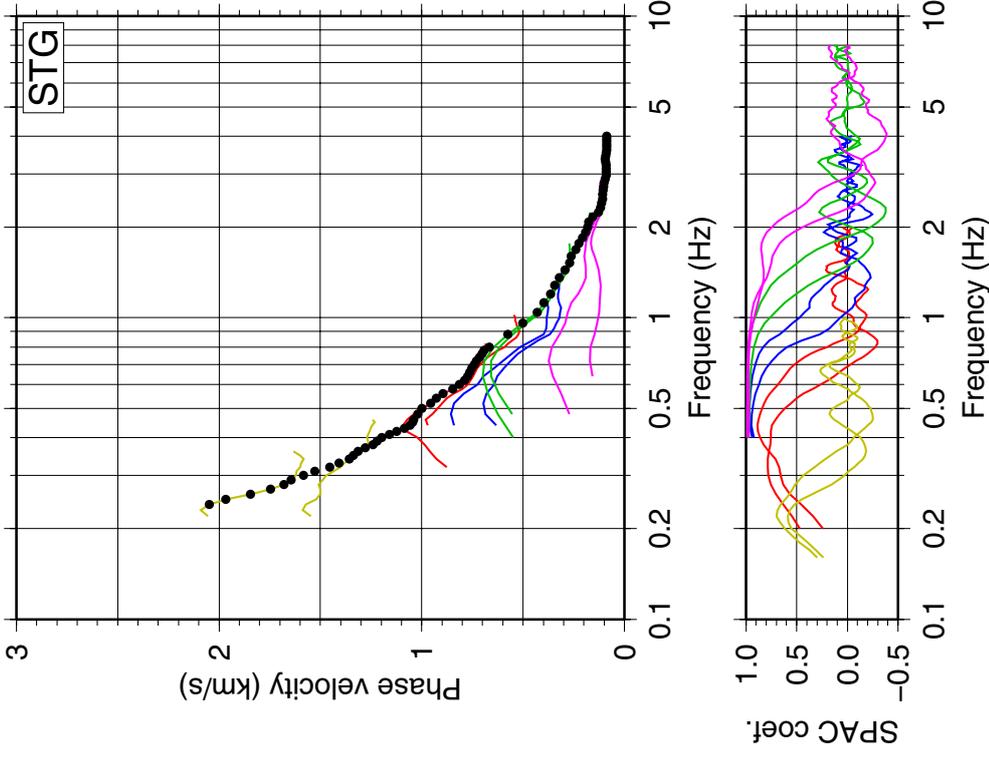
第6図. (上) MHR で推定された位相速度. 各アレイごとの位相速度を  
実線で, それらをつないで1つの分散曲線としたものを黒丸で  
示す. (下) SPAC 係数.

Fig. 6. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the  
microtremor records at the MHR site. Solid lines are the phase  
velocities obtained from each array. Solid circles are the phase  
velocities compiled from the phase velocities of various array  
sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.



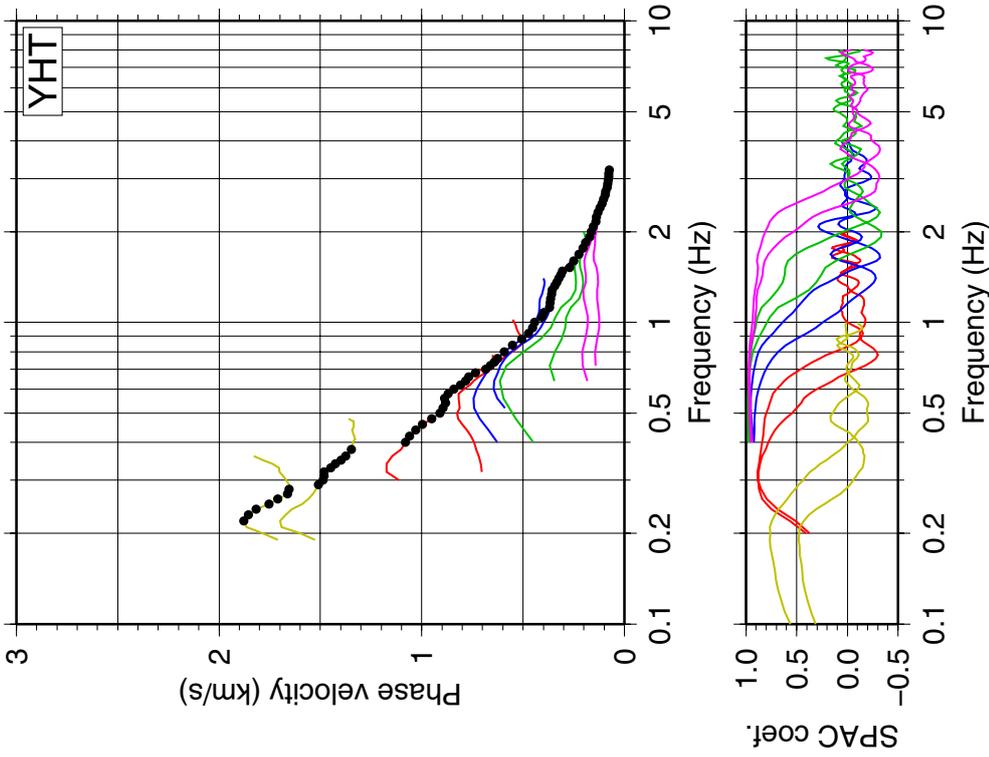
第5図. (上) HGU で推定された位相速度. 各アレイごとの位相速度を  
実線で, それらをつないで1つの分散曲線としたものを黒丸で  
示す. (下) SPAC 係数.

Fig. 5. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the  
microtremor records at the HGU site. Solid lines are the phase  
velocities obtained from each array. Solid circles are the phase  
velocities compiled from the phase velocities of various array  
sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.



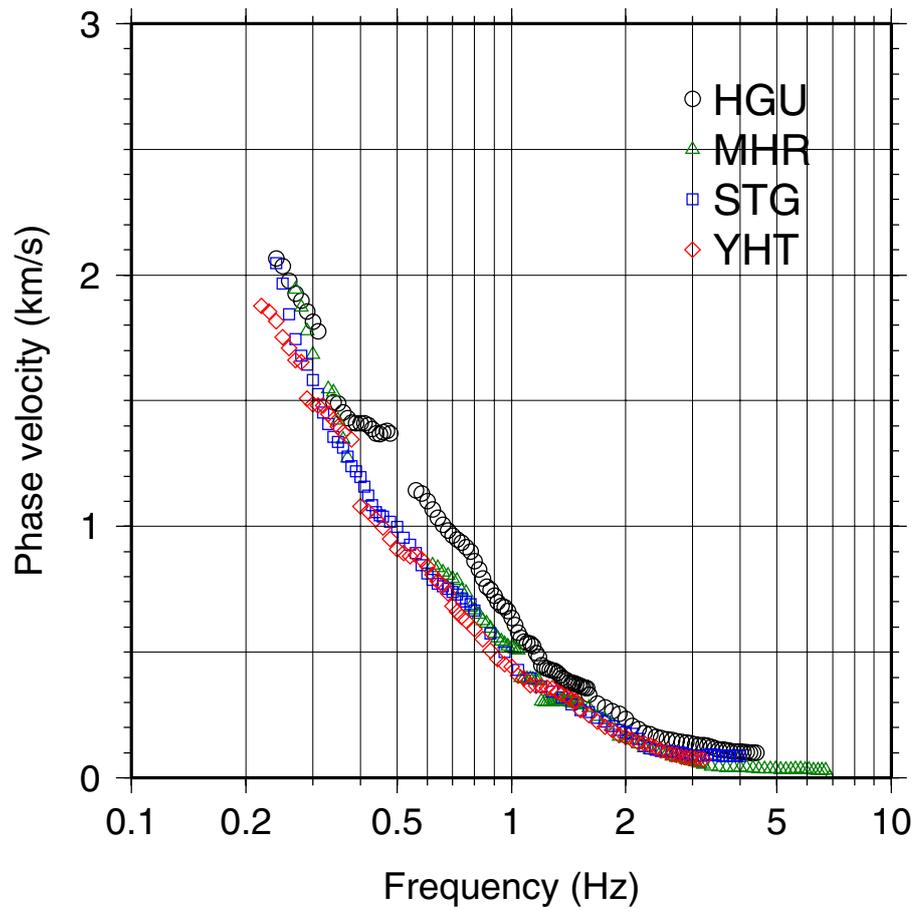
第 8 図. (上) STG で推定された位相速度. 各アレイごとの位相速度を  
実線で, それらをつないで1つの分散曲線としたものを黒丸で  
示す. (下) SPAC 係数.

Fig. 8. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the  
microtremor records at the STG site. Solid lines are the phase  
velocities obtained from each array. Solid circles are the phase  
velocities compiled from the phase velocities of various array  
sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.

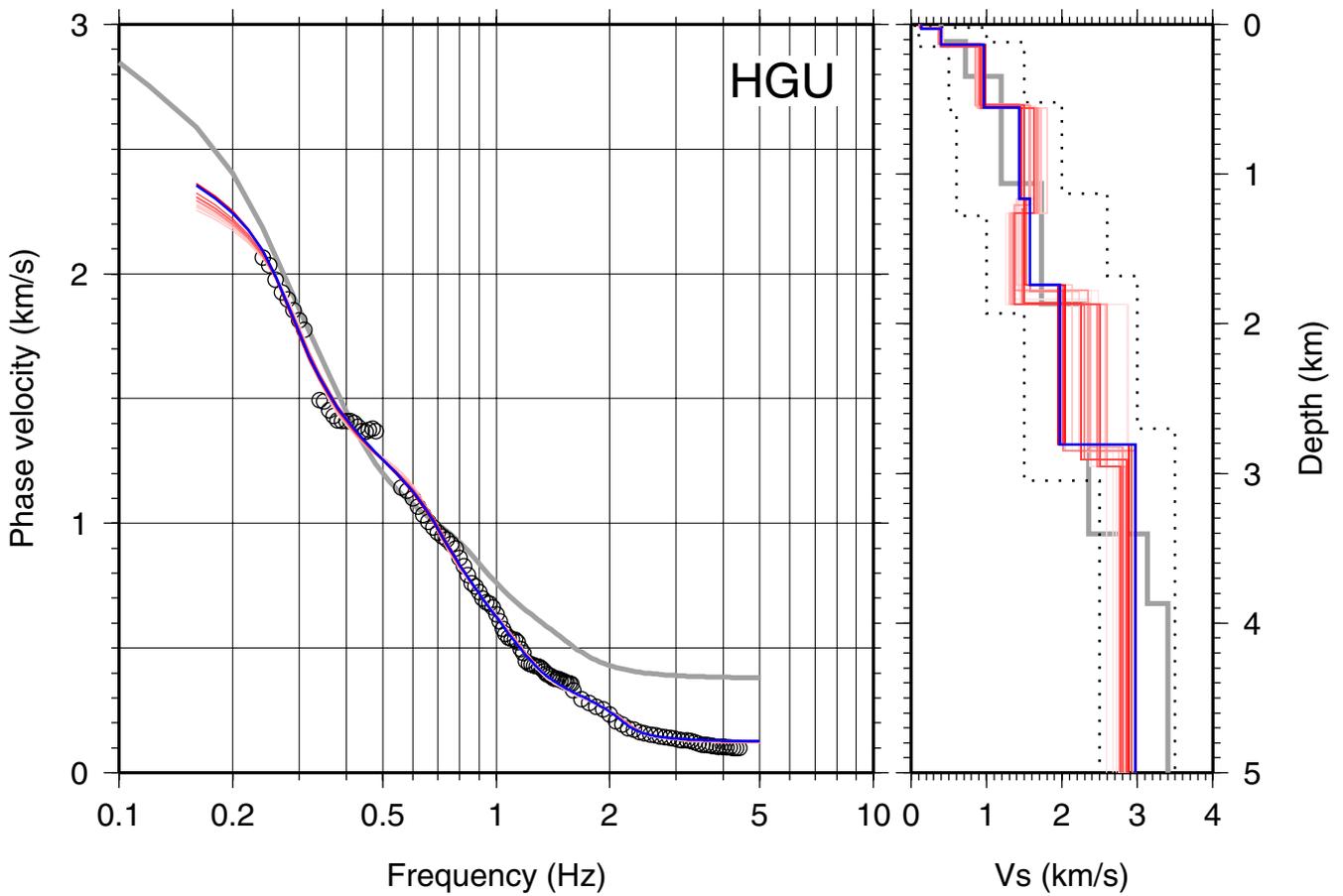


第 7 図. (上) YHT で推定された位相速度. 各アレイごとの位相速度を  
実線で, それらをつないで1つの分散曲線としたものを黒丸で  
示す. (下) SPAC 係数.

Fig. 7. (Top) Phase velocities obtained from SPAC analysis of the  
microtremor records at the YHT site. Solid lines are the phase  
velocities obtained from each array. Solid circles are the phase  
velocities compiled from the phase velocities of various array  
sizes. (Bottom) SPAC (Spatial Autocorrelation) coefficients.

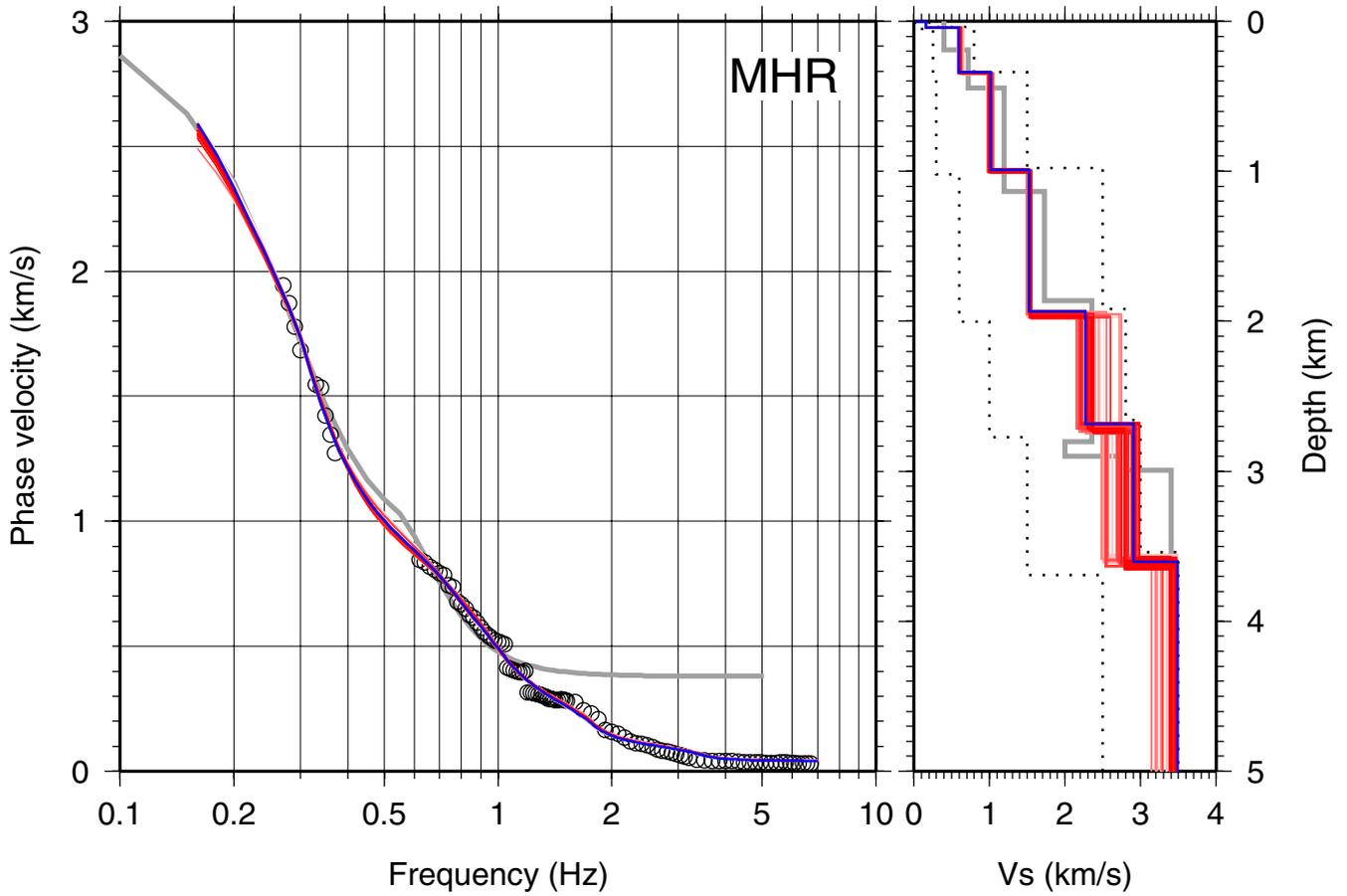


第9図. 石狩平野中央部の4サイトで微動探査法により推定された位相速度.  
Fig. 9. Phase velocities obtained from SPAC analysis of microtremor array records at 4 sites in the Ishikari plain.



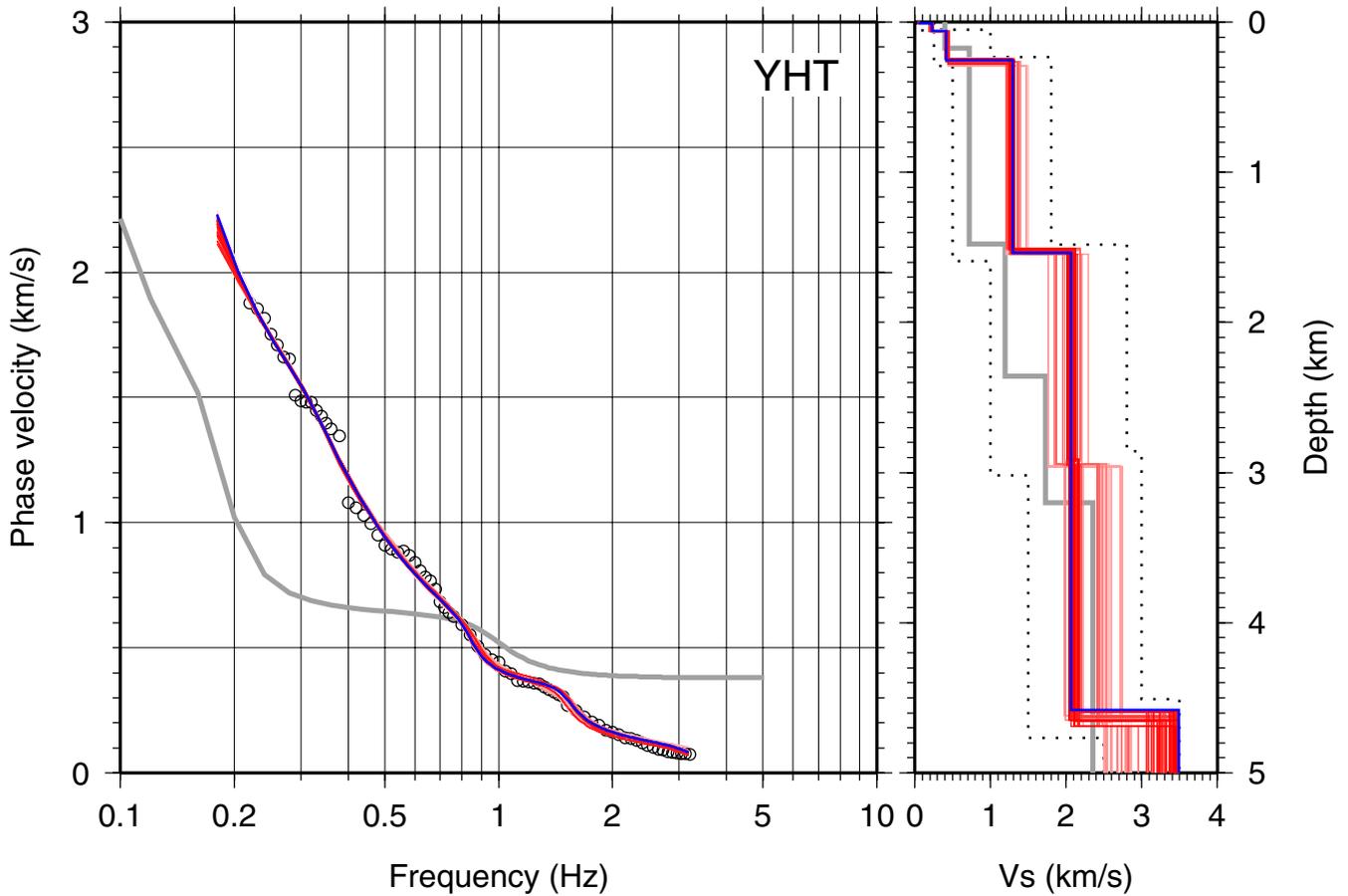
第 10 図. (左) HGU で観測された分散曲線 (白丸) と GA により求めた速度構造から計算した位相速度 (実線) の比較. (右) GA により求めた S 波速度構造. Misfit が最良の構造を青で, misfit が最良値の 125% 以内のものを赤で示した. 灰色の線は地盤構造モデル (吉田ほか, 2007) から取り出した速度構造とそれから計算されたレイリー波基本モードの位相速度を示す. 点線は速度構造の探索で用いた探索範囲を示す.

Fig. 10. (Left) Comparison of the observed phase velocities at the HGU site (open circles) and theoretical phase velocities of the fundamental mode of Rayleigh wave calculated from the various velocity structure models (solid lines). (Right) Velocity structure models. Blue lines indicate the phase velocities calculated from the best fit model and its velocity profile. Red lines show the phase velocities calculated from the estimated profiles within 1.25 times the minimum misfit value of the best profiles and their profiles. Gray lines indicate the phase velocities calculated from the velocity structure model in the Ishikari and Yūfutsu plains by the previous study (Yoshida *et al.*, 2007) at the HGU site and its profile. Dotted lines in the right panel show a search range for the inversion.



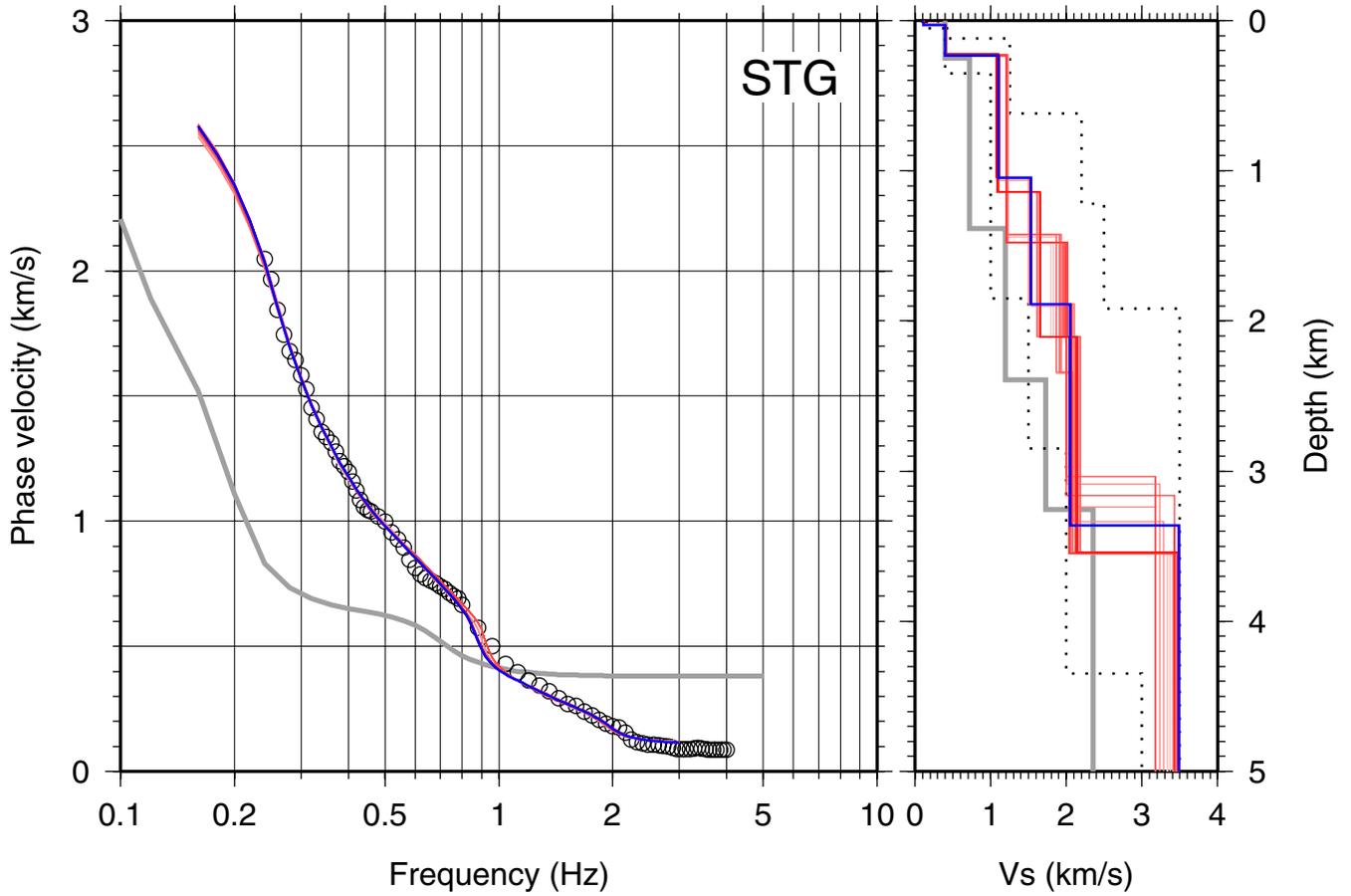
第 11 図. (左) MHR で観測された分散曲線 (白丸) と GA により求めた速度構造から計算した位相速度 (実線) の比較. (右) GA により求めた S 波速度構造. Misfit が最良の構造を青で, misfit が最良値の 125% 以内のものを赤で示した. 灰色の線は地盤構造モデル (吉田ほか, 2007) から取り出した速度構造とそれから計算されたレイリー波基本モードの位相速度を示す. 点線は速度構造の探索で用いた探索範囲を示す.

Fig. 11. (Left) Comparison of the observed phase velocities at the MHR site (open circles) and theoretical phase velocities of the fundamental mode of Rayleigh wave calculated from the various velocity structure models (solid lines). (Right) Velocity structure models. Blue lines indicate the phase velocities calculated from the best fit model and its velocity profile. Red lines show the phase velocities calculated from the estimated profiles within 1.25 times the minimum misfit value of the best profiles and their profiles. Gray lines indicate the phase velocities calculated from the velocity structure model in the Ishikari and Yūfutsu plains by the previous study (Yoshida *et al.*, 2007) at the MHR site and its profile. Dotted lines in the right panel show a search range for the inversion.



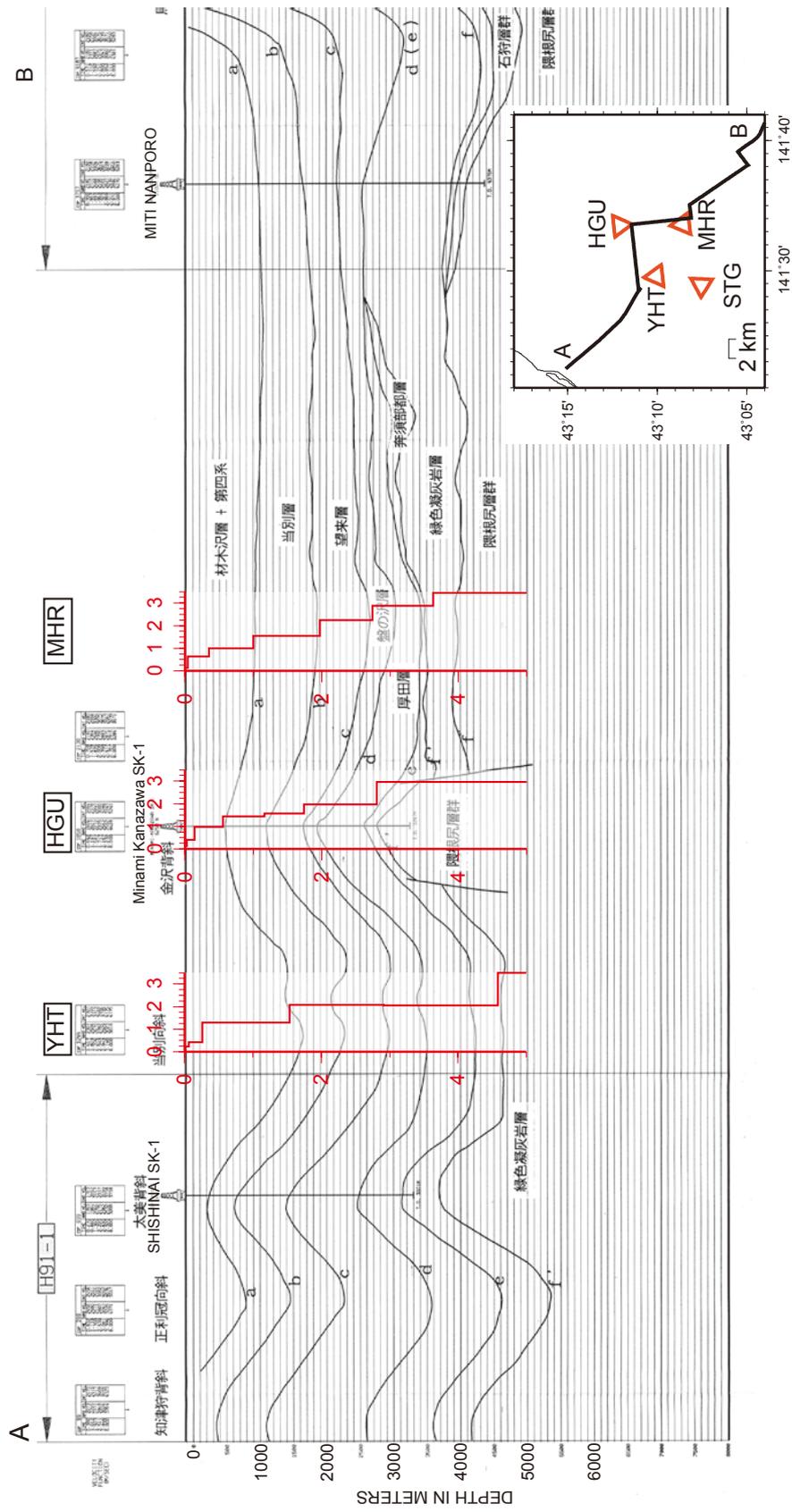
第 12 図. (左) YHT で観測された分散曲線 (白丸) と GA により求めた速度構造から計算した位相速度 (実線) の比較. (右) GA により求めた S 波速度構造. Misfit が最良の構造を青で, misfit が最良値の 125% 以内のものを赤で示した. 灰色の線は地盤構造モデル (吉田ほか, 2007) から取り出した速度構造とそれから計算されたレイリー波基本モードの位相速度を示す. 点線は速度構造の探索で用いた探索範囲を示す.

Fig. 12. (Left) Comparison of the observed phase velocities at the YHT site (open circles) and theoretical phase velocities of the fundamental mode of Rayleigh wave calculated from the various velocity structure models (solid lines). (Right) Velocity structure models. Blue lines indicate the phase velocities calculated from the best fit model and its velocity profile. Red lines show the phase velocities calculated from the estimated profiles within 1.25 times the minimum misfit value of the best profiles and their profiles. Gray lines indicate the phase velocities calculated from the velocity structure model in the Ishikari and Yūfutsu plains by the previous study (Yoshida *et al.*, 2007) at the YHT site and its profile. Dotted lines in the right panel show a search range for the inversion.



第13図. (左)STGで観測された分散曲線(白丸)とGAにより求めた速度構造から計算した位相速度(実線)の比較. (右)GAにより求めたS波速度構造. Misfitが最良の構造を青で, misfitが最良値の125%以内のものを赤で示した. 灰色の線は地盤構造モデル(吉田ほか, 2007)から取り出した速度構造とそれから計算されたレイリー波基本モードの位相速度を示す. 点線は速度構造の探索で用いた探索範囲を示す.

Fig. 13. (Left) Comparison of the observed phase velocities at the STG site (open circles) and theoretical phase velocities of the fundamental mode of Rayleigh wave calculated from the various velocity structure models (solid lines). (Right) Velocity structure models. Blue lines indicate the phase velocities calculated from the best fit model and its velocity profile. Red lines show the phase velocities calculated from the estimated profiles within 1.25 times the minimum misfit value of the best profiles and their profiles. Gray lines indicate the phase velocities calculated from the velocity structure model in the Ishikari and Yūfutsu plains by the previous study (Yoshida *et al.*, 2007) at the STG site and its profile. Dotted lines in the right panel show a search range for the inversion.



第 14 図. 石油公団基礎物理探査「日高地域」による解釈深度断面図 (石油公団, 1993) と本研究の微動探査による速度構造の比較.  
Fig. 14. Comparison of the depth section (after Japan National Oil Corporation, 1993) and the velocity structure model estimated in this study.