

# 微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造 S-wave velocity structure of the Oita plain estimated from array microtremor survey

吉見雅行<sup>1</sup>・吉田邦一<sup>2</sup>・関口春子<sup>3</sup>・堀川晴央<sup>4</sup>・竿本英貴<sup>5</sup>・松浦旅人<sup>6</sup>

Masayuki Yoshimi<sup>1</sup>, Kunikazu Yoshida<sup>2</sup>, Haruko Sekiguchi<sup>3</sup>, Haruo Horikawa<sup>4</sup>,  
Hidetaka Saomoto<sup>5</sup> and Tabito Matsu'ura<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,6</sup> 活断層研究センター (Active Fault Research Center, GSJ/AIST, yoshimi.m@aist.go.jp)

<sup>3</sup> 現在京都大学防災研究所 (Now at Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.)

<sup>5</sup> 株式会社豊田中央研究所 (Toyota Central R&D Labs., Inc.)

**Abstract:** We conducted array microtremor surveys at five sites in the Oita plain, west Japan, in order to estimate the S-wave velocity structure of the sedimentary layers. Three to five different sizes of seismometer arrays were deployed at each site with the largest aperture of 750 to 1600 m depending on the depth to the basement speculated from gravity anomaly data. The phase velocities of the Rayleigh waves were estimated with the Spatial Autocorrelation (SPAC) method and partly with the Extended SPAC method. The S-wave velocity structures were obtained from the phase velocity dispersion curve with Genetic Algorithm. Depth to the basement estimated at every site was comparable to that having been imaged by seismic reflection surveys.

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

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

## 1. はじめに

大分平野は、別府湾の南部、大分川と大野川の河口付近に広がる東西 15 km 南北 5 km ほどの沖積平野である。平野西部の大分川河口付近には市街地が発達し、臨海部の大規模な埋立地には、石油化学コンビナート、製鉄所、発電所等が立地している(第 1 図)。

大分平野を含む別府湾周辺は活発な伸張場である別府-島原地溝(松本, 1979)の北東端および中央構造線の西端部に位置する。基盤深度は反射法探査や重力探査から別府湾中央部で 4000 m、陸域では大分川河口付近で 3000 m に達すると推定されている(由佐ほか, 1992; 広島ほか, 2002; 大分県, 2000, 2002)。この地域の基盤は、南部が三波川変成岩類、北部は領家帯花崗岩で構成されており、その上を、上部白亜系堆積岩類である大野川層群、鮮新-中部更新統の碩南層群及び大分層群、沖積層が覆うと推定されている(吉岡ほか, 1997)。大分平野の温泉ボーリングの掘削深度は 700 m から 800 m 程度で、貯留層は大分層群もしくは碩南層群である(森山・日高, 1986)。

大分平野の厚い堆積層は地震動を増幅する。気象官所における変位型強震計記録を用いた長周期帯域での揺れ易さ評価(岡田・鏡味, 1976, Mamula *et al.*, 1984)では、大分平野では周期 1 秒~10 秒の広

い周期範囲で揺れ易いと指摘されている。大分平野から 280 km 離れた場所で発生した 2000 年鳥取県西部地震では平野内の観測点にて周期 5~10 秒の波が顕著に増幅した継続時間の長い地震動が観測された(奈川ほか, 2002)。近い将来の発生が予想される南海地震の際には、長周期地震動が大分平野にて発達し、湾岸部の石油タンク等に大きな影響が及ぶ可能性がある。

長周期地震動の定量的予測には高精度の 3 次元地盤構造モデルが必要である。本地域は、東京、大阪、名古屋等の大都市圏や日本海側、勇払平野など地下構造探査データの豊富な地域に比べ、地下構造に関するデータが圧倒的に少ない。物理検層を伴った深層ボーリングは平野内では皆無である。

本研究では、地震動評価に必要な基盤までの地下構造、特に S 波速度構造を明らかにすることを目的とし、大分平野にて微動アレイ探査を実施した。

## 2. 微動アレイ探査

### 2.1 微動アレイ

微動アレイ探査とは、表面波の位相速度にみられる分散性(位相速度が周波数によって変化するという性質)を利用して、主に地下の S 波速度構造を推定する手法(例えば Okada, 2003)である。地表に多

数の地震計を展開して地面の微かな揺れ（微動）を観測し、多くの周波数でのレイリー波の位相速度を推定し、地盤のS波速度と層厚を逆解析して求める。人工的な震源や大規模な起震装置を必要としない簡便な探査手法であり、近年、地下構造探査への適用が進んでいる。

## 2.2 微動アレイ観測

大分平野の臨海部および大野川沿いの5地点にて微動アレイ探査を実施した。観測位置の概略およびブーゲー異常分布をそれぞれ第2図、第3図に、観測点配置の詳細を第4図から第8図に、アレイ諸元を第1表に示す。アレイの最大半径は、既存の反射法地震探査および重力異常から推定される基盤深度を参考に、臨海部で1500m、大野川沿いの南部では1000m程度とした。アレイ形状は重心を共有する大小2つの正三角形の各頂点と重心からなる7点アレイを基本とした。大小の正三角形の半径比は2前後となるようにした。

観測は2006年12月12～16日、2007年1月12日の昼間に実施した。各観測点では、独立型の地震観測装置を用いて上下動を連続的に観測した。使用機器は、サーボ型速度計VSE-15D1（感度10V/kine、東京測振製）およびデータロガーLS-7000XT（GPS時刻較正、A/D 24bit、白山工業製）である。なお、Lアレイ中心点および探査地点の周辺にて水平2成分、鉛直1成分の3成分の観測も実施した。この3成分の観測での使用機器は、過減衰コイル式加速度計JEP-6A3（2.2V/G、ミツトヨ製）と200倍アンプ、およびデータロガーLS-7000XTである。観測装置の写真を第9図に、観測風景を第10図に示す。

NSSアレイ（第4図）は大分川右岸河口付近の西ノ洲地区に位置し、最大半径1600mの7点アレイ（Lアレイ）、最大半径300mの7点アレイ（Mアレイ）および半径20mの4点アレイ（Nアレイ）から成る。アレイ中心点を含む観測点の大半は製鐵所の敷地内に設定した。しかし、後日実施したNアレイはL、Mアレイの中心からは離れた場所に設定した。

MSAアレイ（第5図）は大野川左岸河口付近の三佐地区に位置し、最大半径1500mの7点アレイ（Lアレイ）、半径300mの4点アレイ（Mアレイ）、半径60mの4点アレイ（Sアレイ）および半径20mの4点アレイ（Nアレイ）から成る。Lアレイ中心点およびS、Nアレイは緑地のグラウンド内に設定した。

AOSアレイ（第6図）は大野川右岸河口付近の青崎地区に位置し、最大半径1480mの7点アレイ（Lアレイ）、半径300mの4点アレイ（Mアレイ）、半径100mの4点アレイ（Sアレイ）および半径20mの4点アレイ（Nアレイ）から成る。Lアレイのうち一箇所は幹線道路沿いにある。S、Nアレイは交通ノイズのほとんどない環境にある。

TRSアレイ（第7図）は大野川の河口から5kmほどの鶴崎地区に位置し、最大半径1000mの7点アレイ（Lアレイ）、半径200mの4点アレイ（Mアレイ）、半径50mの4点アレイ（Sアレイ）および半径20mの4点アレイ（Nアレイ）から成る。アレイ中心点は大野川とその西側の乙津川に挟まれた運動公園内に設定した。

MRGアレイ（第8図）は大野川の河口から8km上流の左岸側、丸亀地区に位置し、最大半径750mの7点アレイ（Lアレイ）、半径80mの4点アレイ（Sアレイ）および半径20mの4点アレイ（Nアレイ）から成る。アレイ中心点は農道上に設定した。車の通行は時折見られたが概して静かであった。

アレイの配置に際しては、アレイが張る領域内に大きな構造変化点が入らないよう、既存の地質断層および活断層を避けることが望ましい。しかし、大きなアレイ半径が要求される臨海部のMSAアレイおよびAOSアレイではやむを得ず想定活断層（千田ほか、2004）を跨いでいる。これらの点では微動アレイ探査により求まる速度構造はアレイ範囲の地下構造の平均的な像となることが予想される（佐藤ほか、2006）。

## 3. Rayleigh 波の位相速度の推定

### 3.1 解析方法

観測波形を観測半径ごとに整理し、アレイで対象とする周波数範囲を考慮してバンドパスフィルターを施し、8192サンプル（サンプリングレートに応じて163.84秒、81.92秒、40.96秒区間）を解析区間の基本単位として波形を分割した。フィルター周波数を第2表に、フィルターを施した波形の一例を第11図に、フーリエスペクトルを第12図に示す。すべて昼間の観測であったため、場所によっては大きなノイズが含まれるデータが取得されたが、そのようなデータは解析からはできるだけ排除した。分割した波形のうち、同一半径のアレイを構成する全観測点の波形が時間的、空間的に安定した区間に対して空間自己相関（SPAC）法（例えばOkada, 2003）を適用し、位相速度を推定した。その後、観測半径ごとに推定された位相速度の分散曲線を全アレイについて整理し、全体を包絡するような位相速度を取捨選択あるいは平均化するなどして求め、分散曲線の推定値とした。なお、推定された位相速度にバラツキが大きい周波数に対しては、周波数を固定して半径毎に空間自己相関係数を整理し、0次Bessel関数を最小二乗フィッティングすることにより位相速度を推定した（拡張空間自己相関法：Extended SPAC, ESPAC (Okasda, 2003)）。

### 3.2 解析結果

各地点での空間自己相関法の適用結果を第13図に

示す。各地点での位相速度を上方の図に、半径毎に平均した空間自己相関係数を下方の図に示す。臨海部の 3 地点 (NSS, MSA, AOS) では 0.26 Hz まで、TRS では 0.4 Hz まで、MRG では 0.6 Hz までの位相速度が推定された。図中の折れ線は、ある半径のデータを基に決定された位相速度を表す。最終的な分散曲線はデータの質やコヒーレンスを参照しながら、これら折れ線を包絡するように決定した。最終的な分散曲線は図中の白丸○で示されている。なお、NSS, MSA, AOS の低周波数側では、各アレイ半径のデータからの位相速度の推定にばらつきが見られたため、ESPAC 法を適用して位相速度を決定した。この際、空間自己相関係数 (SPAC 係数) に大きなばらつきがみられる観測半径はフィッティングの対象からはずした。また、NSS の 0.5 Hz 付近は周囲の周波数帯に比べて顕著に SPAC 係数がばらつく傾向がみられた。この周波数は分散曲線の変曲点にあっていたため、分散曲線の連続性を優先し、ノイズの影響が小さいと考えられる観測半径 (800 m 以下) のデータを用いて ESPAC 法により位相速度を決定した。

全観測点分の推定分散曲線を第 14 図に示す。臨海部の 3 地点 (NSS, MSA, AOS) の分散曲線は周波数 0.5 Hz 以下の低周波領域でほぼ重なっている。大野川沿いの 3 地点 (AOS, TRS, MRG) の分散曲線は、南側 (内陸側) の観測点ほど位相速度が大きく、図の右上に位置している。地震基盤層および堆積層の S 波速度がほぼ同一であると仮定すると、海側の 3 地点の基盤深度に大きな違いはなく、大野川沿いでは南ほど基盤が浅くなる傾向にあると推察される。

## 4. S 波速度構造の推定

### 4.1 推定手法

前節にて推定された位相速度の分散曲線から各地点の地下構造 (S 波速度構造) を推定する。ここでは、分散曲線がレイリー波基本モードのものであると仮定し、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた逆解析手法 (山中・石田, 1995) により S 波速度構造を推定する。これは、多数の S 波速度構造の中から、理論分散曲線と観測分散曲線とのノルム最小のものを解として選択するものである。探索パラメータは S 波速度と層厚である。なお、理論分散曲線の計算には P 波速度値および密度値も必要であるが、探査地点では深層ボーリングや速度検層、密度検層などの情報がないため、一般的な経験式 (Ludwig *et al.*, 1970) に基づいて S 波速度値から P 波速度値と密度値を与えた。

地層の総数は、大分平野の地質が沖積層・段丘構成層、鮮新・中部更新統、上部白亜系堆積岩類、基盤岩類で構成される (吉岡ほか, 1997) ことを参考に基盤が深いと想定される臨海部では 6 層、基盤が

浅いと想定される内陸部の TRS, MRG では 5 層とした。S 波速度の探索範囲は深部ほど大きな S 波速度となるよう留意し、地質年代を考慮して第 3 表および第 4 表のように設定した。なお、第 1 層のみに 400 m/s 以下の S 波速度を許し、第 2 層以降の S 波速度は 400 m/s 以上としている。第 2 層以降地震基盤までの層の S 波速度の探索範囲は互いにある程度重なるようにした。分散曲線の特徴から、基盤深度がある程度大きいと予想される臨海部の 3 地点については第 2 層以降の各層の層厚が少なくとも 100 m あるものとした。一方、基盤深度が臨海部よりは浅いと推察される TRS と MRG については最小の層厚を 5 m とした。いずれの地点においても複数回の探索を実施し、残差最小となる速度構造を最終解とした。

### 4.2 推定された S 波速度構造

推定した S 波速度構造および理論分散曲線と観測値との比較を第 15 図から第 19 図に示す (赤線)。理論分散曲線は観測分散曲線をよく説明している。NSS, MSA, AOS の基盤深度は 2500 m 程度、TRS では 1500 m 程度、MRG では 600~1000 m 程度である。5 地点の S 波速度構造には、 $V_s = 200 \sim 400$  m/s 程度の表層、 $V_s = 600$  m/s 程度の第 2 層、 $V_s = 1000 \sim 1300$  m/s 程度の第 3 層、 $V_s = 1500 \sim 2000$  m/s 程度の第 4 層がほぼ共通して見られる。

さて、平野全体の地震動を差分法のような領域法で計算するには、地層の物性値が統一されていると都合が良い。そこで、まず 5 地点の S 波速度構造を、 $V_s = 400$  m/s 以下の表層、 $V_s = 600$  m/s 程度の層、 $V_s = 1000$  m/s 程度の層、 $V_s = 1500 \sim 1800$  m/s 程度の層、 $V_s = 1900 \sim 2100$  m/s 程度の層および地震基盤に限定し、第 5 表、第 6 表のように S 波速度の探索範囲を狭くして再度 S 波速度構造を探索した。この探索では平野全体のモデル化に都合が良いように、TRS, MRG にも 6 層構造を設定している。なお、NSS については第 1 層の探索範囲を 200 m とした。これは第 1 層の探索範囲を MSA, AOS と同様に設定すると、分散側線を高次モードとするような解が得られがちであったためである。推定結果を第 15 図から第 19 図の青線で示す。どの観測点の推定結果も観測分散曲線をよく説明している。ただし、 $V_s = 1900 \sim 2100$  m/s の層は MRG 以外では層厚が薄く求まったことから、この層を仮定しなくても分散曲線が説明できる可能性があると考え、 $V_s = 1900 \sim 2100$  m/s の層を除いて再度 S 波速度構造を探索した。探索範囲は第 5 表、第 6 表から当該層を除いたものである。推定結果を第 15 図から第 19 図の緑線で示す。

### 4.3 考察

推定した S 波速度構造を大分平野における反射法地震探査の深度断面図 (吉見ほか, 2007) と重ねて示す。第 20 図は大分川測線の深度断面と NSS アレ

イの推定 S 波速度構造との重ね図、第 21 図は大野川測線の深度断面と MSA, AOS, TRS, MRG アレイの推定 S 波速度構造との重ね図である。深度断面図上の白地の数字は反射法の区間速度 (m/s) である。各アレイの深度断面への投影は、重力異常のコンターのひかれる方向が概ね基盤の等深度線の方向を示すと考え、コンターに沿って行った。すなわち、大分川測線沿いでは東西方向投影、大野川測線沿いでは北東-南西方向に投影した (第 3 図参照)。

NSS は大分川測線の北端部付近、府内断層の北側に投影される (第 20 図)。ここでは、基盤と推定される強い反射面が深度 3000 m に位置し、それより上位が堆積層と考えられる。堆積層内は、反射断面にて成層構造の明瞭な深度 1000 m 付近までが大分・碩南層群、それより下位の成層構造の不明瞭な部分が上部白亜系大野川層群に相当すると推定されている (大分県, 2000)。微動アレイ探査により推定された NSS の S 波速度構造の基盤深度は 2000~2400 m であり、反射法探査からの推定値と 500 m 以上の差が生じている。このように、両者がうまく対応しているとは言えないが、各地層の S 波速度を大まかに対応付けると第 7 表のようにまとめられる。

大野川測線には、最北端に MSA、三佐断層と志村断層の間に AOS、反射測線の中央部付近に TRS、測線南端より 3 km 北側に MRG が投影される (第 21 図)。基盤は、深度断面の測線南端から明瞭な反射面として追跡でき TRS 投影位置では約 1500 m、MRG 投影位置では約 900 m である。微動アレイ探査により推定された基盤深度は、TRS で約 1500 m、MRG で約 1000 m であり反射法探査結果と整合する。一方、反射測線北端の MSA および AOS 位置付近では基盤に相当する反射面は不明瞭であるが、微動アレイ探査から推定された基盤深度 (MSA で 2400~2700 m、AOS で 2200~2400 m) 付近に反射強度の大きな箇所がみられ、ここに向けて南側からの反射面がほぼ単調に深度を増しているように見える。ブーゲー異常分布 (第 3 図) からは、大野川測線沿いで基盤深度が北へ単調増加すると推察されるが、この傾向と一致している。したがって、微動アレイ探査による推定基盤深度はほぼ妥当と考えられる。

大野川測線沿いの 4 点での推定 S 波速度構造を基に、同様な S 波速度の層を結ぶと 2 次元の S 波速度構造が推定される (第 21 図の青点線)。S 波速度 1500 m/s 以上の層は TRS から MSA までほぼ同様な層厚であるのに対し、S 波速度 1000 m/s 以下の層は概して北部の方が層厚が大きい。大分川測線と同様に、地質と S 波速度とを大まかに対応付けると第 8 表のようにまとめられる。大野川測線の周辺では三波川変成岩類と大分・碩南層群が接する (吉岡ほか, 2007) ため、ここではすべての層を大分・碩南層群として記載した。この対応付けに従うと、大分・碩南層群相当層の S 波速度は上位と下位とで 600 m/s

から 1500 m/s もしくは 2000 m/s と大きな隔たりがあることになる。特に S 波速度 1500 m/s は大分川沿いの大野川層群の推定 S 波速度と同等である。この地域の深部ボーリングが皆無であるため地層の実態は不明であるが、推定した S 波速度から判断すると、大野川測線周辺の深部にも大分・碩南層群より古い時代の堆積層・堆積岩が存在すると考えるほうが自然である。ただし、S 波速度が 1500 m/s を超える層の反射イメージ (図 21) は大分川測線 (図 20) でイメージされる上部白亜系と似ている部分もあるが、成層構造が明瞭な部分もみられることに注意が必要である。S 波速度構造の推定の妥当性、地質区分の妥当性の両者の検討が必要であると考えられる。

## 5. まとめ

大分平野の長周期地震動を評価するため、平野の中央部及び東部の 5 箇所にて微動アレイ探査を実施した。各地点におけるアレイの最大半径は臨海部で 1500 m 程度、内陸部で 1000 m 程度とし、位相速度が連続的に推定できるような半径 20 m の最小アレイまで複数の半径のアレイを設定して微動を測定した。SPAC 法および ESPAC 法により、すべての地点において最小位相速度 300 m/s から最大 2000 m/s 程度までの分散曲線が推定された。この分散曲線を満足するような S 波地下構造を GA により推定した。さらに、各地点の推定 S 波速度構造に概ね共通していた S 波速度に探索範囲を限定して、再度 GA により地下構造を推定した。その結果、5 地点でほぼ共通の S 波速度の地層で構成され、かつ、観測分散曲線を概ね説明する S 波速度構造が推定された。この S 波速度構造の基盤深度は既存の反射法地震探査から推定される基盤深度と概ね整合していた。さらに、反射法探査の深度断面の情報を基に、地質と S 波速度の対応を提示した。

本研究により得られた S 波速度構造の妥当性は分散曲線に拠っている。臨海部の NSS, MSA, AOS の低周波数帯域では位相速度の推定値が観測半径によりばらつきがあり ESPAC 法を適用せざるを得なかった。したがって、低周波側の位相速度の推定誤差は大きいと推察される。これは観測を昼間に実施したために工場ノイズや交通ノイズが観測波形に混入したことが原因と考えられる。今後は、ノイズの少ない夜間などの観測結果との比較や、反射法地震探査の区間速度を考慮した解析、微動の水平/鉛直スペクトル比あるいは地震観測記録を用いた検証を通して、S 波地下構造の妥当性を検証することが必要と考えられる。

謝辞 微動アレイ探査の実施にあたり、新日本製鐵株式会社、九州電力株式会社、九州石油株式会社、昭和電工株式会社には敷地内への立入り等の便宜を

図っていただきました。京都大学防災研究所岩田知孝教授、大学院生（当時）栗山雅之氏、岩城麻子氏には探査にご協力いただきました。横倉隆伸氏からのコメントは本稿の改善に役立ちました。一部の図の作成には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を使用いたしました。記して感謝いたします。本研究は経済産業省委託研究「長周期震動耐震性評価研究」の一環として実施されたものです。

## 文 献

- 千田 昇・竹村恵二・松田時彦・島崎邦彦・池田安隆・岡村 眞・水野清秀・松山尚典・首藤次男 (2004) 大分平野東部に伏在する活断層，活断層研究，24, 185-198.
- 地質調査総合センター (2004) 日本重力 CD-ROM 第2版.
- 広島俊男・森尻理恵・駒澤正夫・牧野雅彦・村田泰章・名和一成 (2002) 大分地域の重力異常について，地質調査研究報告，53, 11-36.
- Ludwig, W. J. *et al.* (1970) Seismic Refraction, The Sea, 4, 53-84, edited by Maxwell, A., Wiley InterScience, New York.
- Mamula, Lj., Kudo, K. and Shima, E. (1984) Distribution of Ground-Motion Amplification Factors as a Function of Period (3-15 sec), Bull. Earthq. Res. Inst. Univ Tokyo, 467-500.
- 松本徭夫 (1979) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題，地質学論集，16, 127-139.
- 森山善蔵・日高 稔 (1986) 大分市温泉の地質，大分温泉調査研究会報告，38-49.
- 奈川泰久・岩田知孝・入倉孝次郎 (2002) 2000年鳥取県西部地震において大分平野で観測された長周期 (5-10s) 地震波のシミュレーション，地球惑星科学関連学会2002年合同大会予稿集，S081-S007.
- Okada, H. (2003) The Microtremor Survey Method (translated by Koya Suto), Geophysical Monograph Series, No.12, Society of Exploration Geophysicists.
- 岡田成幸・鏡味洋史 (1976) 日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み，日本建築学会論文報告集，29-38.
- 大分県 (2000) 平成11年度地震関係基礎調査交付金「別府一万年山断層帯に関する調査成果報告書」.
- 大分県 (2002) 平成13年度地震関係基礎調査交付金「別府一万年山断層帯に関する調査成果報告書」.
- 佐藤浩章・佐藤清隆・東 貞成・朱牟田義治 (2006) 電力施設での被害事例に学ぶ微動アレイ探査の耐震対策への活用～既設変電所を対象とした適用性について～，物理探査，59, 141-150.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released, EOS Trans., AGU, 79 (47), 579.
- 山中浩明・石田 寛 (1995) 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，466, 9-17.
- 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博 (1997) 大分地域の地質，地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅)，地質調査所，65p.
- 吉見雅行・山田浩二・秋永康彦 (2007) 大分平野南部における反射法地震探査，日本地震学会秋季大会，P2-066.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・中川一郎・小林芳正・久保寺 章・須藤靖明・井川 猛・浅田正陽 (1992) 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造，地震2，45, 199-212.

(受付: 2008年10月6日, 受理: 2008年11月11日)

第1表. 微動アレイの諸元.  
Table 1. List of the properties of microtremor arrays.

地点名	アレイ半径	回転角 [ 半径大 → 小, 時計回り ] [deg.]	収録周波数 [Hz]	アレイ中心位置		測定日 (yyyy/mm/dd)	開始時刻	終了時刻
				緯度 [deg.]	経度 [deg.]			
NSS	L (1600 m, 800 m)	53.8	50	33.2550	131.6384	2006/12/14	09:30	11:36
	M (300 m, 100 m)	27.5	100	33.2545	131.6388	2006/12/14	14:30	15:28
	N (20 m)	-	200	33.2516	131.6291	2007/01/12	10:15	10:45
MSA	L (1500 m, 700 m)	8.9	50	33.2641	131.6831	2006/12/13	09:50	12:29
	M (300 m)	-	100	33.2633	131.6840	2006/12/12	14:04	15:04
	S (60 m)	-	100	33.2640	131.6825	2006/12/12	14:33	15:02
	N (20 m)	-	200	33.2641	131.6828	2007/01/12	11:21	11:42
AOS	L (1480 m, 800 m)	73.7	50	33.2600	131.7068	2006/12/15	10:00	13:00
	M (300 m)	-	100	33.2617	131.7087	2006/12/15	14:30	15:36
	S (60 m)	-	100	33.2643	131.7091	2006/12/15	14:37	15:28
	N (20 m)	-	200	33.2632	131.7083	2006/12/15	14:18	14:38
TRS	L (1000 m, 510 m)	68.8	50	33.2261	131.6907	2006/12/16	09:30	11:20
	M (200 m)	-	100	33.2261	131.6905	2006/12/13	14:20	15:17
	S (50 m)	-	100	33.2254	131.6905	2006/12/13	15:00	15:45
	N (20 m)	-	200	33.2254	131.6906	2006/12/16	12:01	12:13
MRG	L (750 m, 300 m)	53.0	50	33.2022	131.6855	2006/12/12	10:50	12:10
	S (80 m)	-	100	33.2033	131.6863	2006/12/12	13:00	13:31
	N (20 m)	-	200	33.2023	131.6856	2007/01/12	14:00	14:22

第2表. 解析に用いた観測データのフィルター周波数範囲.  
Table 2. List of filtering frequency ranges.

		周波数範囲 [Hz]
NSS	L	0.1 - 1.0
	M	0.1 - 2.5
	N	1.0 - 10.0
MSA	L	0.1 - 2.0
	M	0.1 - 7.5
	S	0.1 - 10.0
	N	1.0 - 10.0
AOS	L	0.1 - 2.0
	M	0.2 - 5.0
	S	1.0 - 10.0
	N	0.5 - 10.0
TRS	L	0.2 - 2.0
	M	0.2 - 2.5
	S	0.5 - 7.5
	N	0.8 - 10.0
MRG	L	0.4 - 3.0
	S	0.8 - 10.0
	N	0.8 - 10.0

第3表. S波速度および層厚の探索範囲 (NSS, MSA, AOS).  
Table 3. Search ranges of S-wave velocity and layer thickness of each layer in the inversion analysis using GA for sites NSS, MSA and AOS.

	S-wave velocity [m/s]	Thickness [m]
1	80 - 400	0 - 300
2	400 - 800	100 - 1000
3	600 - 1300	100 - 1600
4	800 - 1800	100 - 3000
5	1300 - 2500	100 - 4000
6	2700 - 3300	-

第 4 表. S 波速度および層厚の探索範囲 (TRS, MRG).  
Table 4. Same as Table 3 but for sites TRS and MRG.

	S-wave velocity [m/s]	Thickness [m]
1	80 - 400	0 - 500
2	400 - 800	5 - 1600
3	600 - 1500	5 - 1600
4	1000 - 2500	5 - 2000
5	2700 - 3300	-

第 6 表. S 波速度の制約を強くした際の探索範囲 (TRS, MRG).

Table 6. Same as Table 5. but for sites TRS and MRG.

	S-wave velocity [m/s]	Thickness [m]
1	100 - 400	0 - 500
2	600 - 700	0 - 2000
3	1000 - 1100	0 - 2000
4	1500 - 1800	0 - 3000
5	1900 - 2100	0 - 4000
6	2700 - 3300	-

第 8 表. 大野川反射法探査測線との比較から推定される各地層の S 波速度.

Table 8. Relation of S-wave velocity to geological units along the Ohno-gawa river speculated from Fig. 21.

	S-wave velocity [m/s]
沖積層 Holocene	200
大分・碩南層群の上部 upper Plio-Pleistocene	600 - 700
大分・碩南層群の中部 middle Plio-Pleistocene	1000
大分・碩南層群の下部? lower Plio-Pleistocene ?	1500
大分・碩南層群の下部? lower Plio-Pleistocene?	2000
三波川変成岩類 Basement (Metamorphic rocks)	3000

第 5 表. S 波速度の制約を強くした際の探索範囲 (NSS, AOS, MSA).

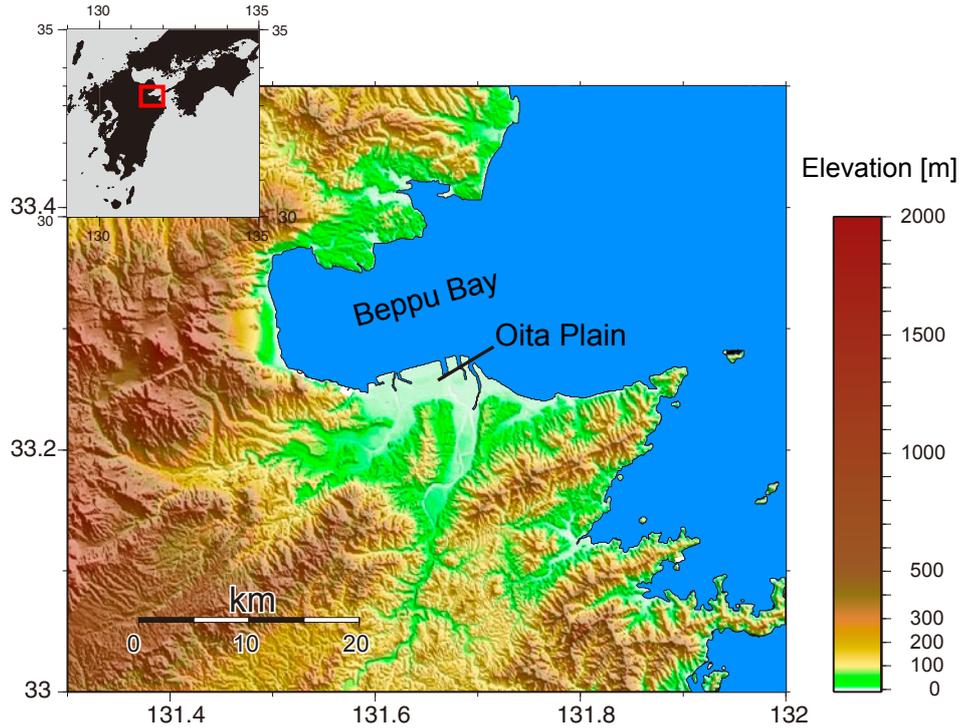
Table 5. Search ranges of S-wave velocity and layer thickness for strongly constrained case for sites NSS, MSA and AOS.

	S-wave velocity [m/s]	Thickness [m]
1	100 - 300	0 - 500 (0-200:NSS)
2	600 - 700	100 - 2000
3	1000 - 1100	100 - 2000
4	1500 - 1800	100 - 3000
5	1900 - 2100	0 - 4000
6	2700 - 3300	-

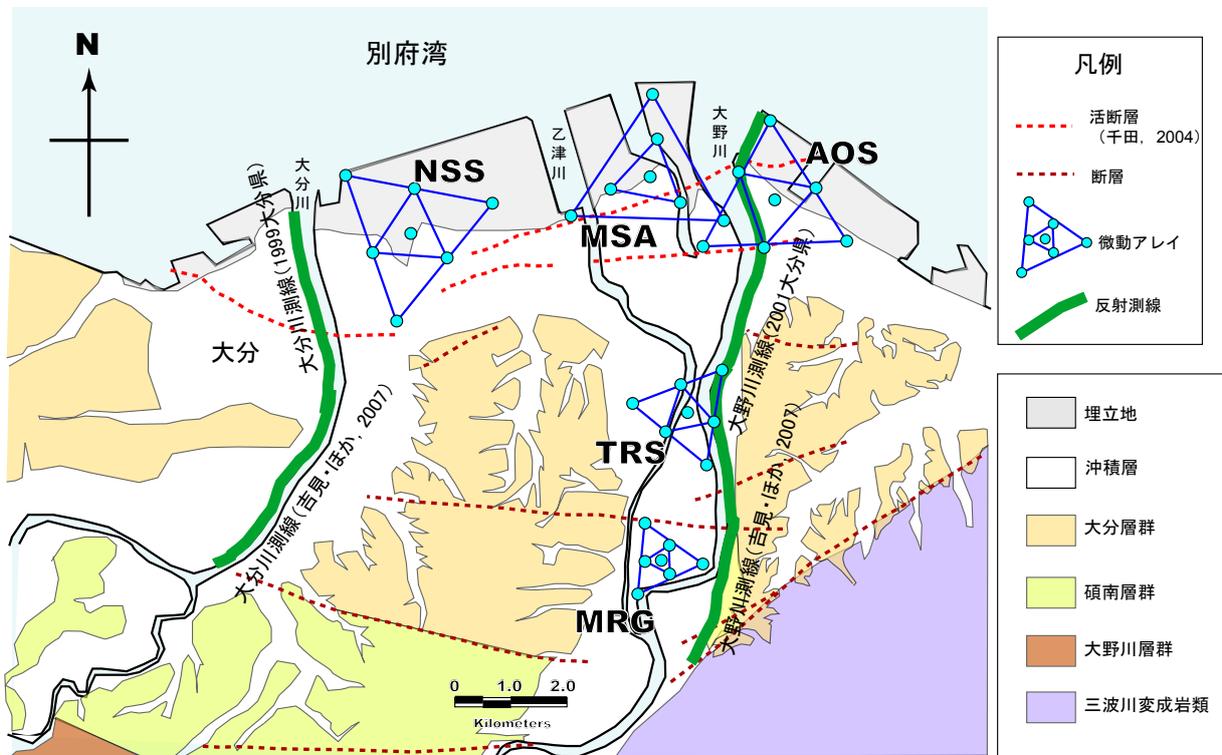
第 7 表. 大分川反射法探査測線と NSS 地点の比較から推定される各地層の S 波速度.

Table 7. Relation of S-wave velocity to geological units around Oita-gawa river speculated from Fig. 20.

	S-wave velocity [m/s]
大分・碩南層群の上部 upper Plio-Pleistocene	300
大分・碩南層群の下部 lower Plio-Pleistocene	700
大野川層群? Upper Cretaceous ?	1500
基盤岩 Basement	3000

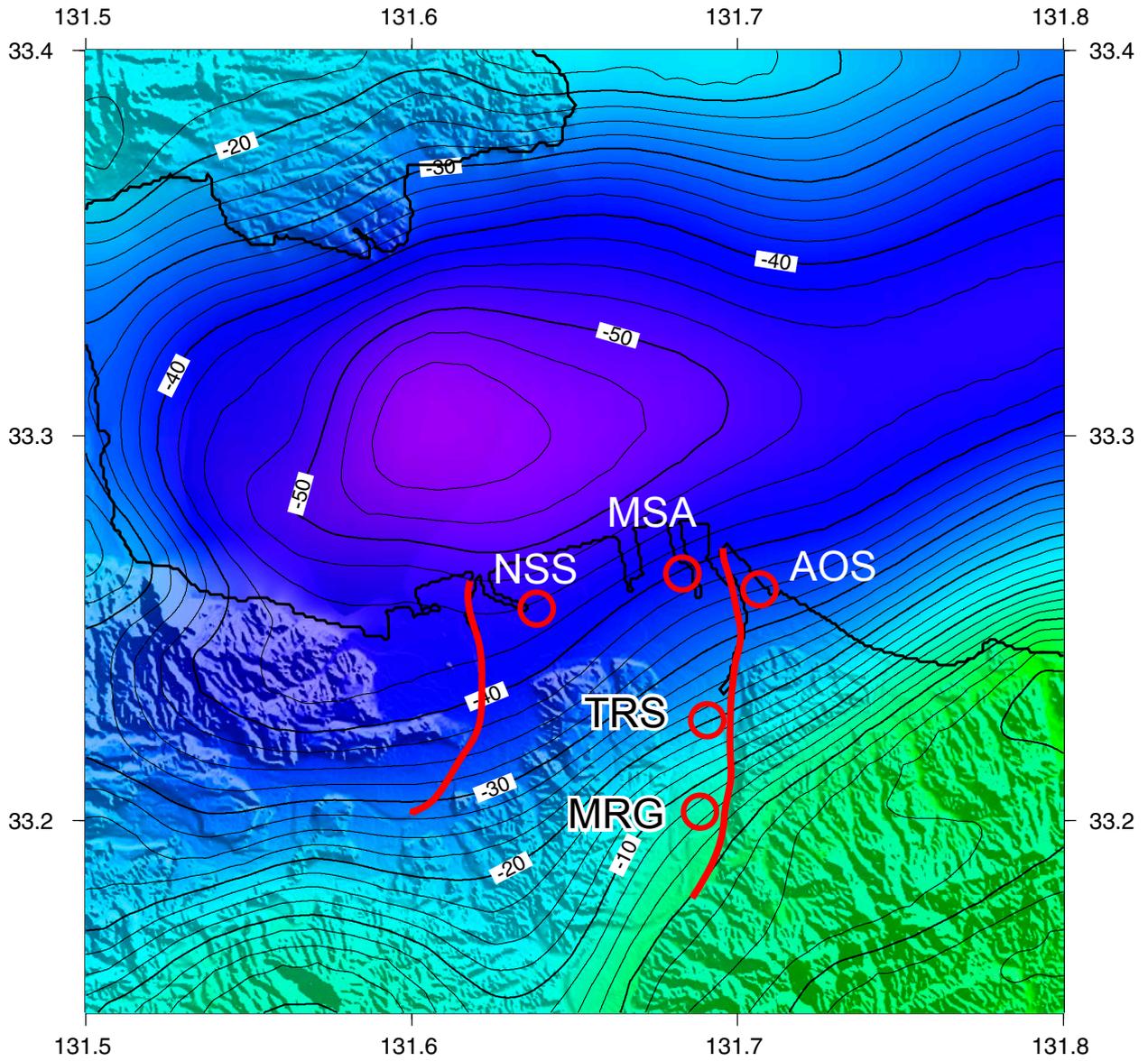


第1図. 大分平野の位置図(国土地理院 50m メッシュ数値標高データ使用).  
Fig. 1. Map around the Oita plain, microtremor observation site.



第2図. 微動アレイ配置と反射法地震探査測線および周辺の地質(地質, 地質断層位置は吉岡ほか(1997), 活断層位置は千田ほか(2004)).

Fig. 2. Location map of observation arrays (triangles with circles), reflection surveys (red curves: Yoshioka *et al.* (2007), and green dashed curves: Oita prefecture (1999,2001)), geologic faults (dashed lines in blown: Yoshioka *et al.* (1997)), active faults (dashed lines in red: Chida *et al.* (2004)) and geology (from Yoshioka *et al.*(1997)).

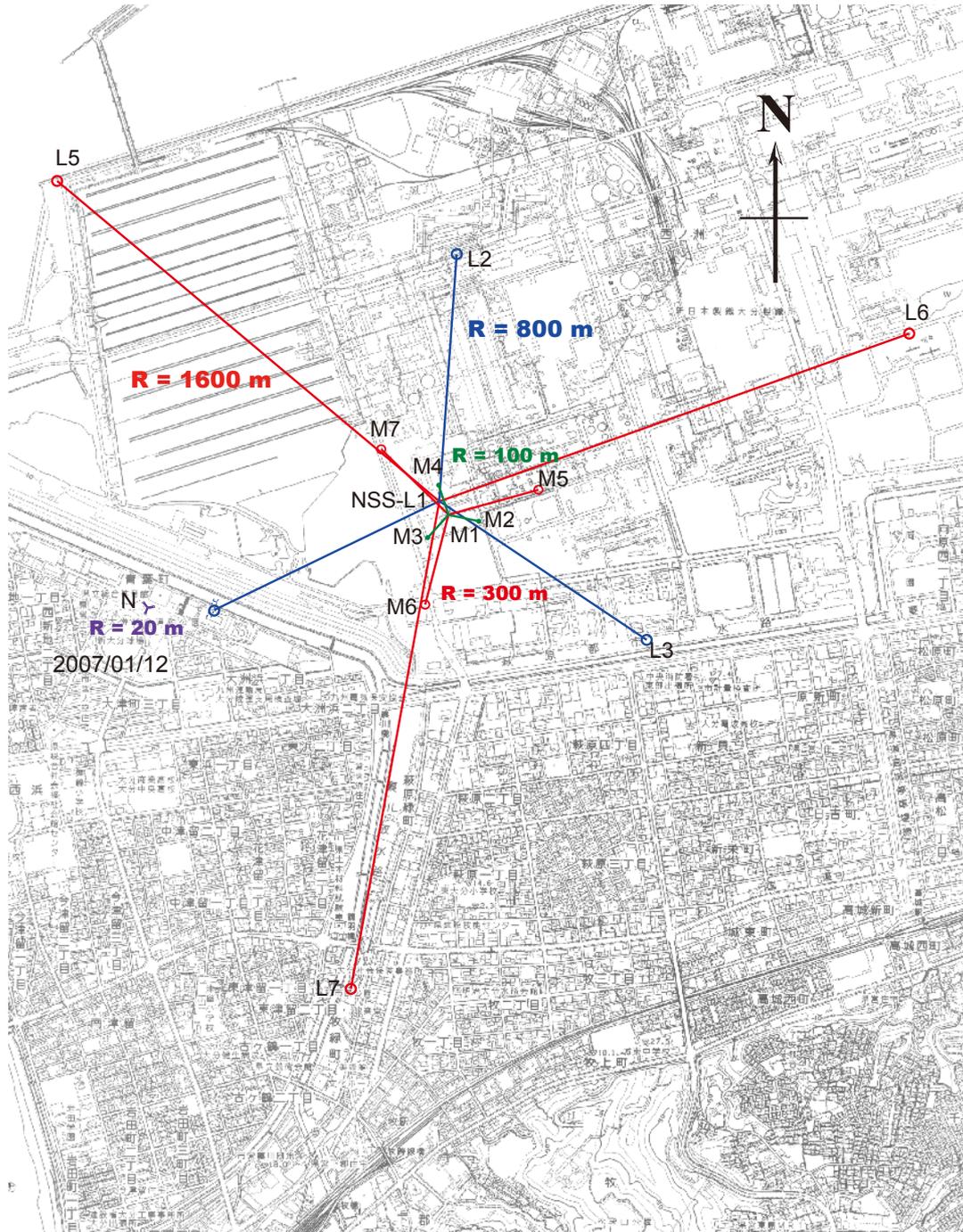


第3図. 観測点周辺のブーゲー異常 (仮定密度  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , 地質調査総合センター, 2004).  
Fig. 3. Bouguer anomalies (assumed density  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , GSJ, 2004) around the observation area (red open circles) and reflection profiles nearby (red curves).

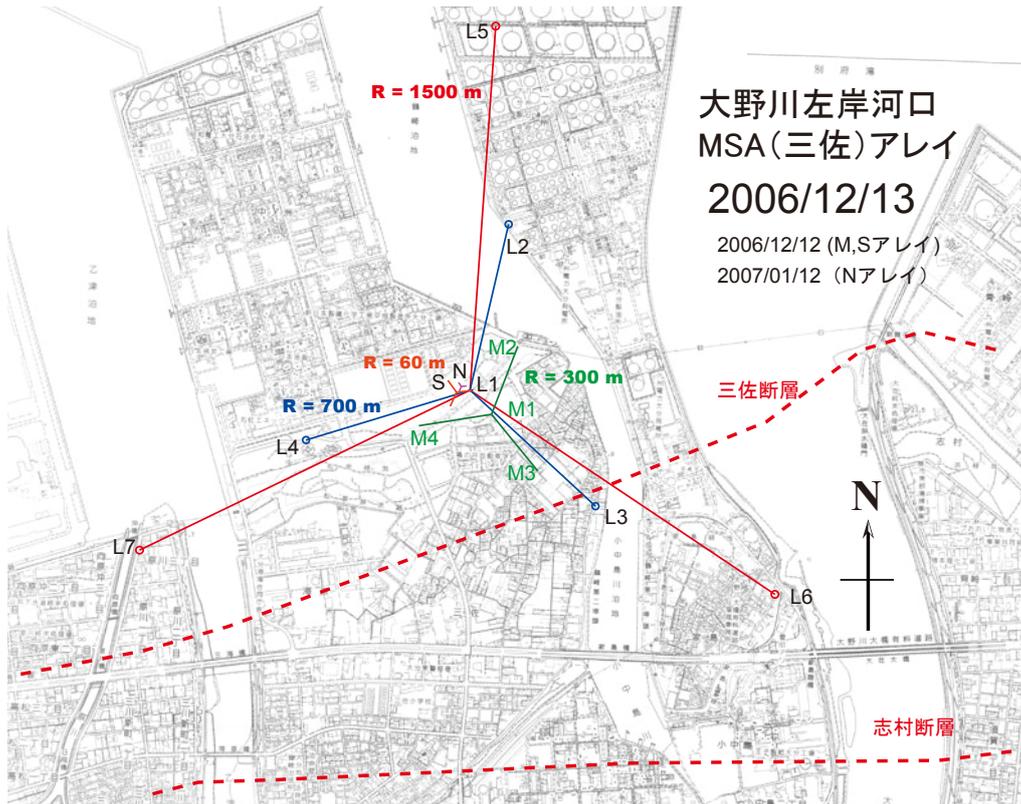
# 大分川右岸河口

## NSS(西ノ洲) アレイ配置図

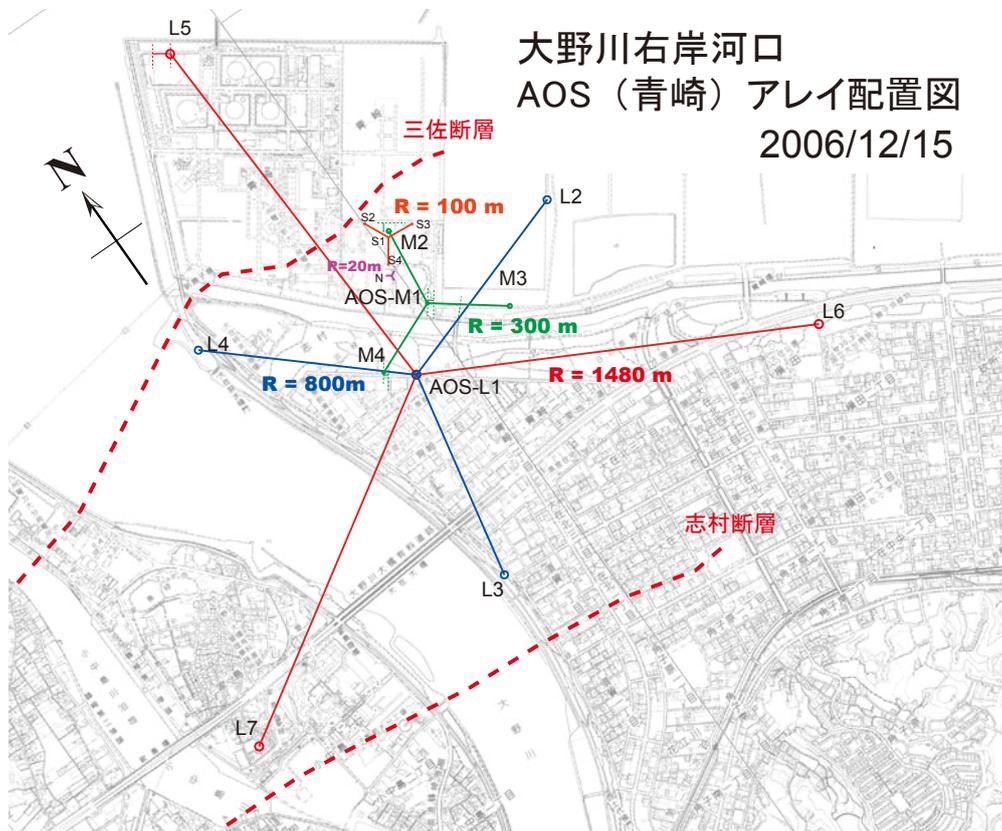
2006/12/14



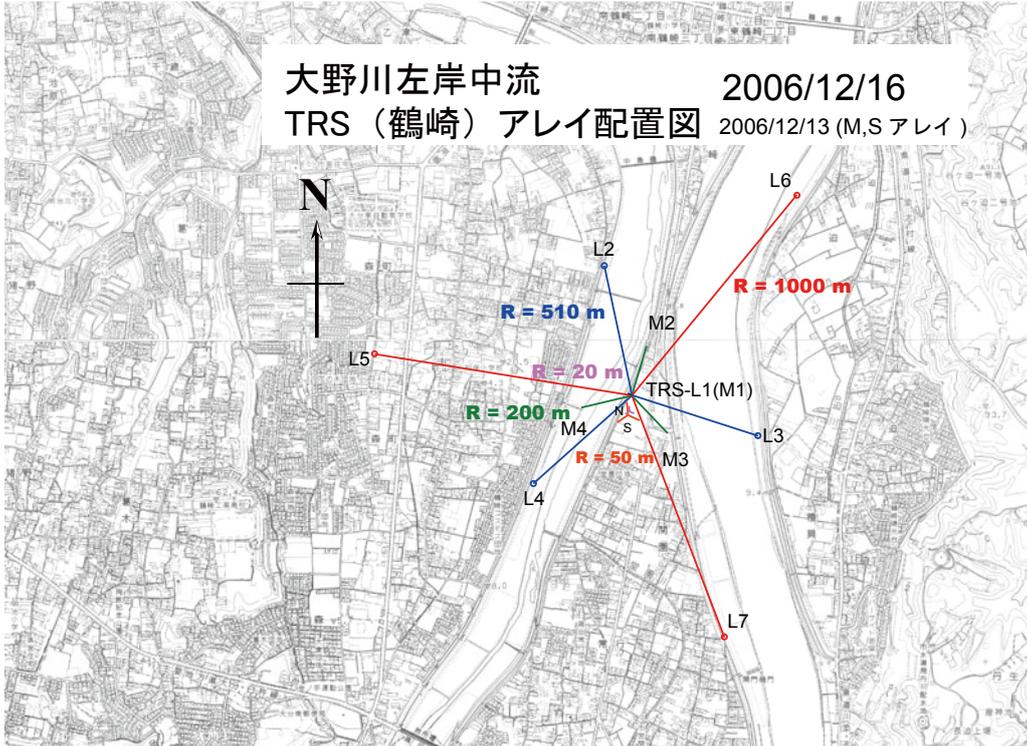
第 4 図. NSS アレイ配置図. 各線分の端点が地震計設置点を表す (基図は大分市都市計画図).  
Fig. 4. Location map of observation points of the NSS seismometer array. Every termination of line segment denotes observation point.



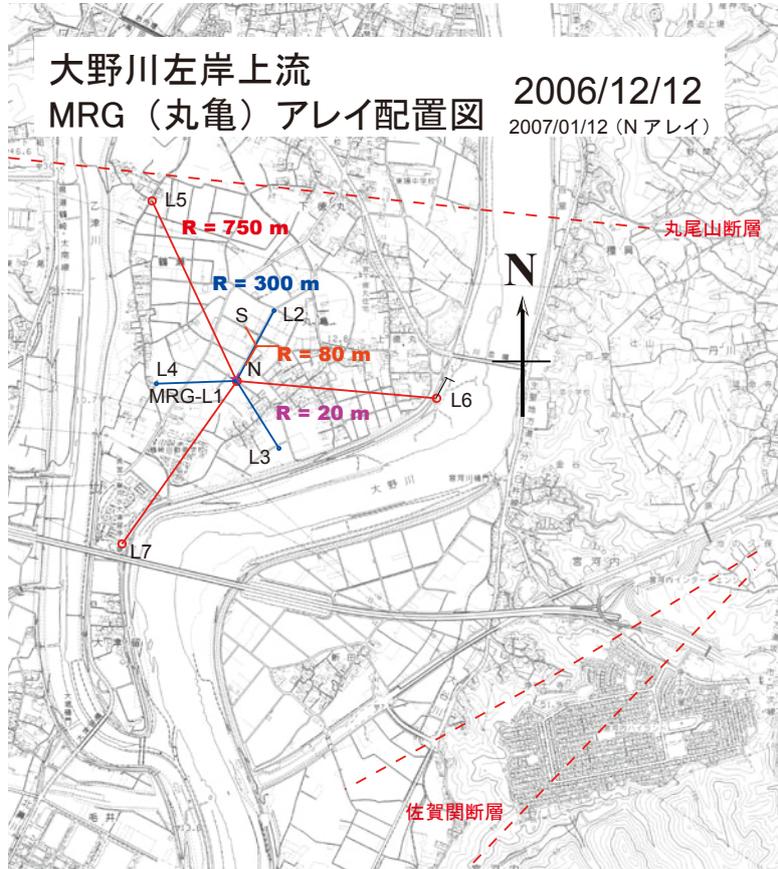
第5図. MSAアレイ配置図(基図は大分市都市計画図, 断層位置は千田ほか(2004)).  
Fig. 5. Location map of observation points of the MSA seismometer array.



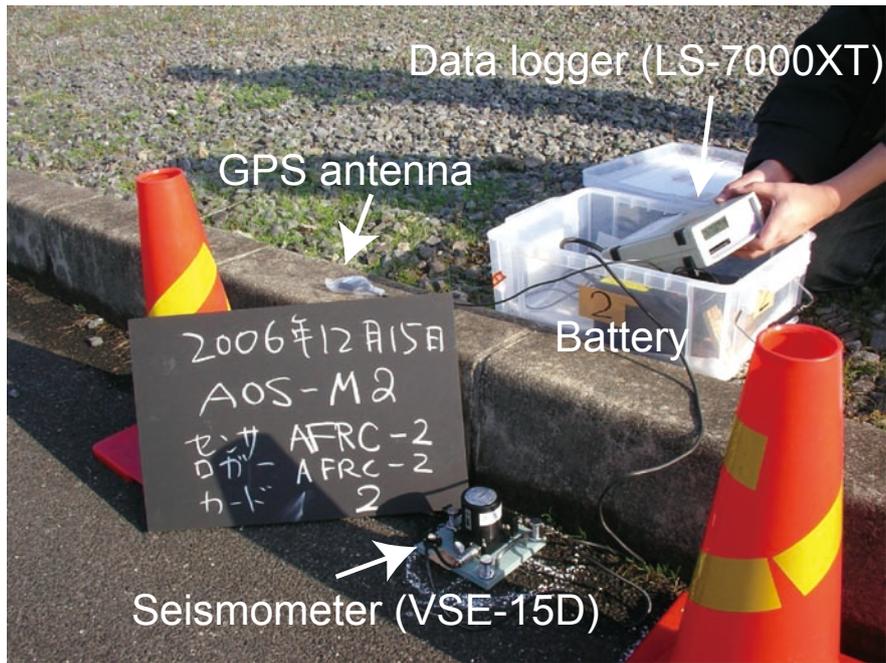
第6図. AOSアレイ配置図(基図は大分市都市計画図, 断層位置は千田ほか(2004)).  
Fig. 6. Location map of observation points of the AOS seismometer array.



第7図. TRS アレイ配置図 (基図は大分市都市計画図).  
 Fig. 7. Location map of observation points of the TRS seismometer array.

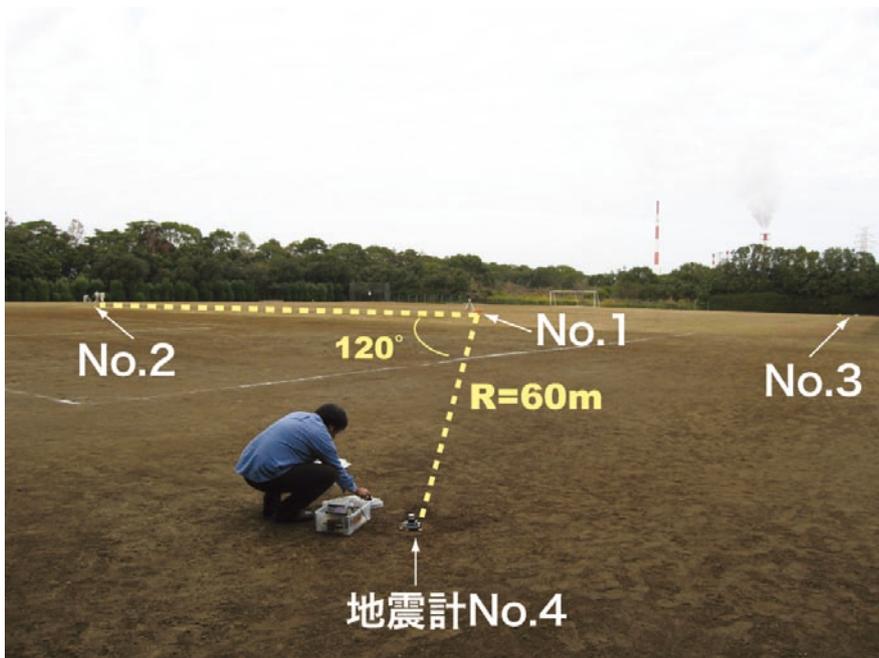


第8図. MRG アレイ配置図 (基図は大分市都市計画図, 断層位置は吉岡ほか(1997)).  
 Fig. 8. Location map of observation points of the MRG seismometer array.



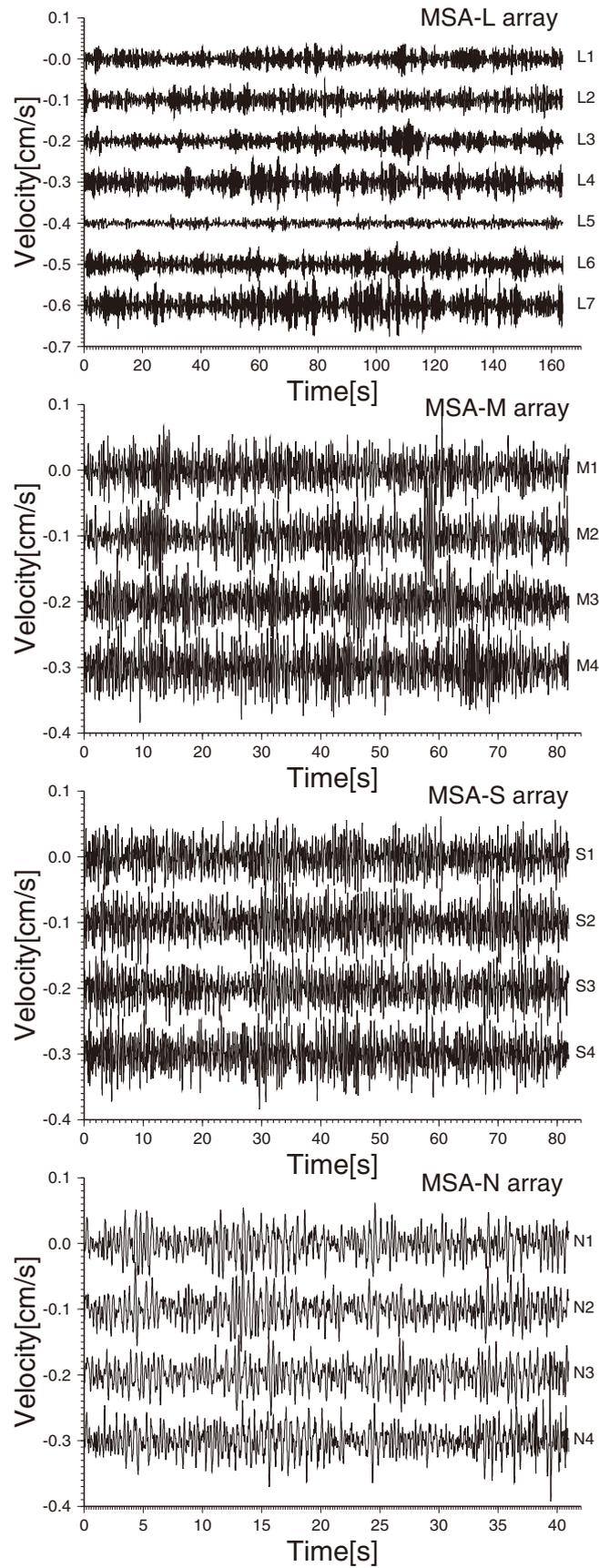
第9図. 観測装置写真.

Fig. 9. Observational system used at each observation point.



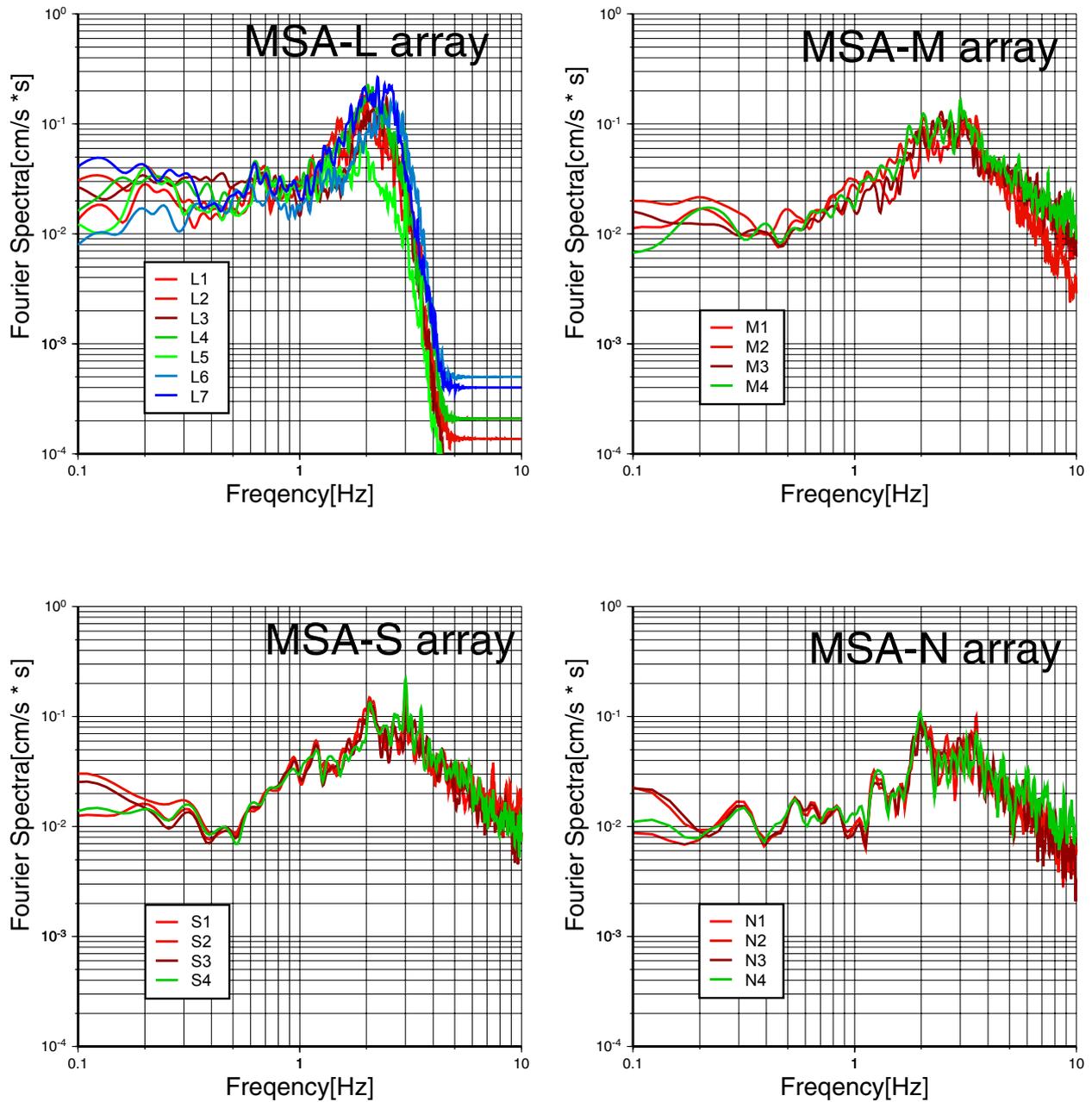
第10図. 微動観測風景 (MSA-S アレイ).

Fig. 10. Photo of microtremor array observation (MSA-S array).



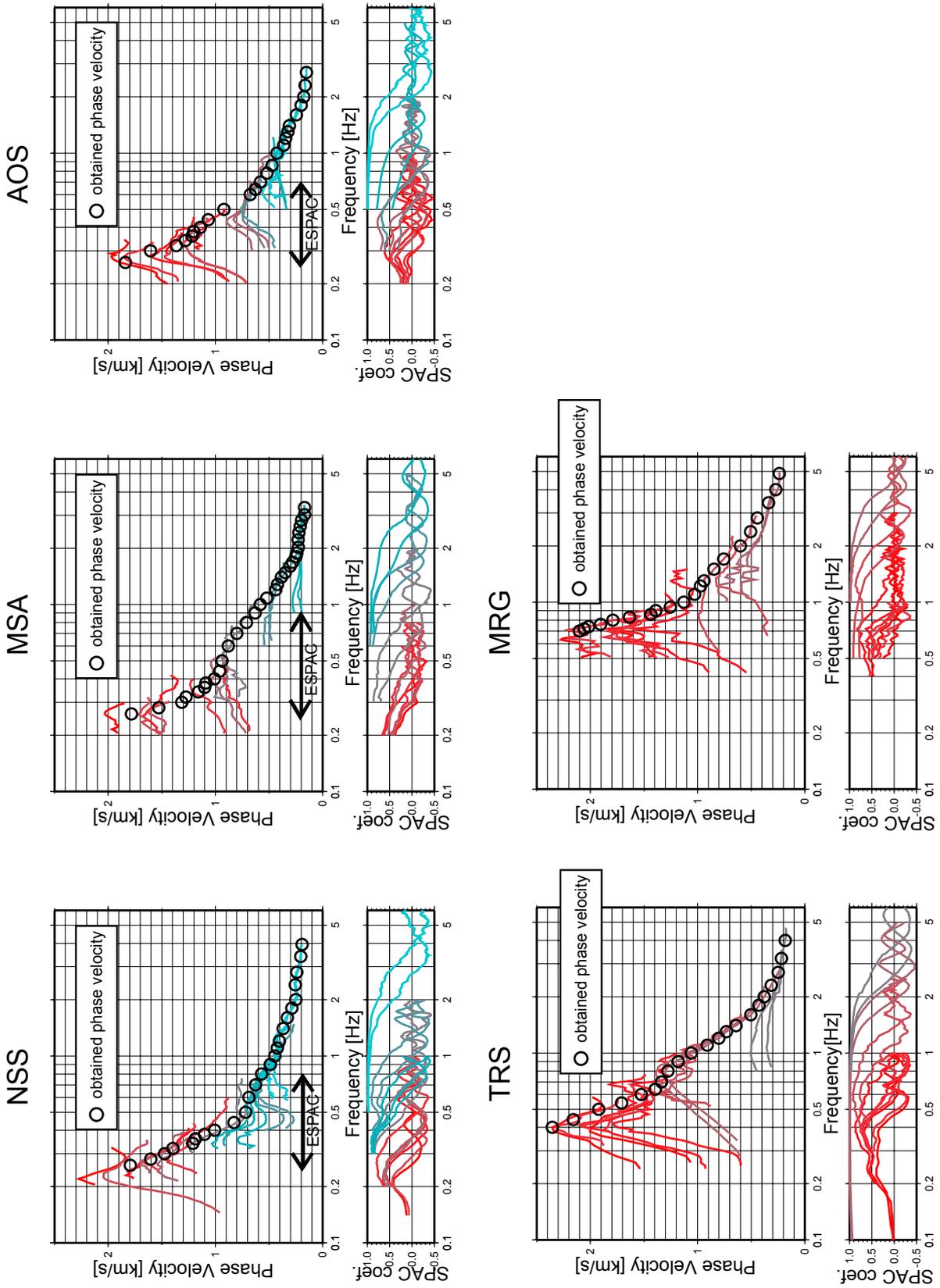
第11図. 観測波形の一例 (MSAアレイ).

Fig. 11. Examples of observed microtremor velocity records.

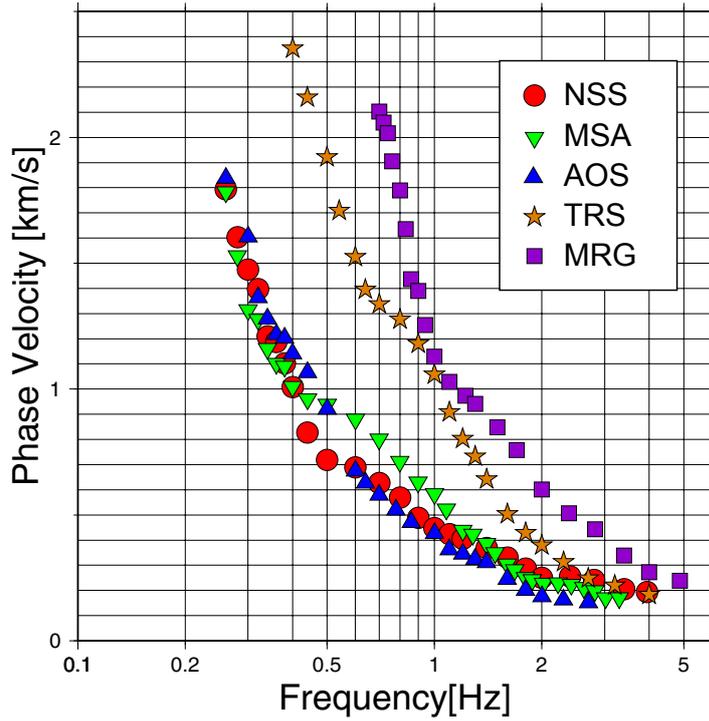


第12図. 図11に示した観測波形のフーリエスペクトル.

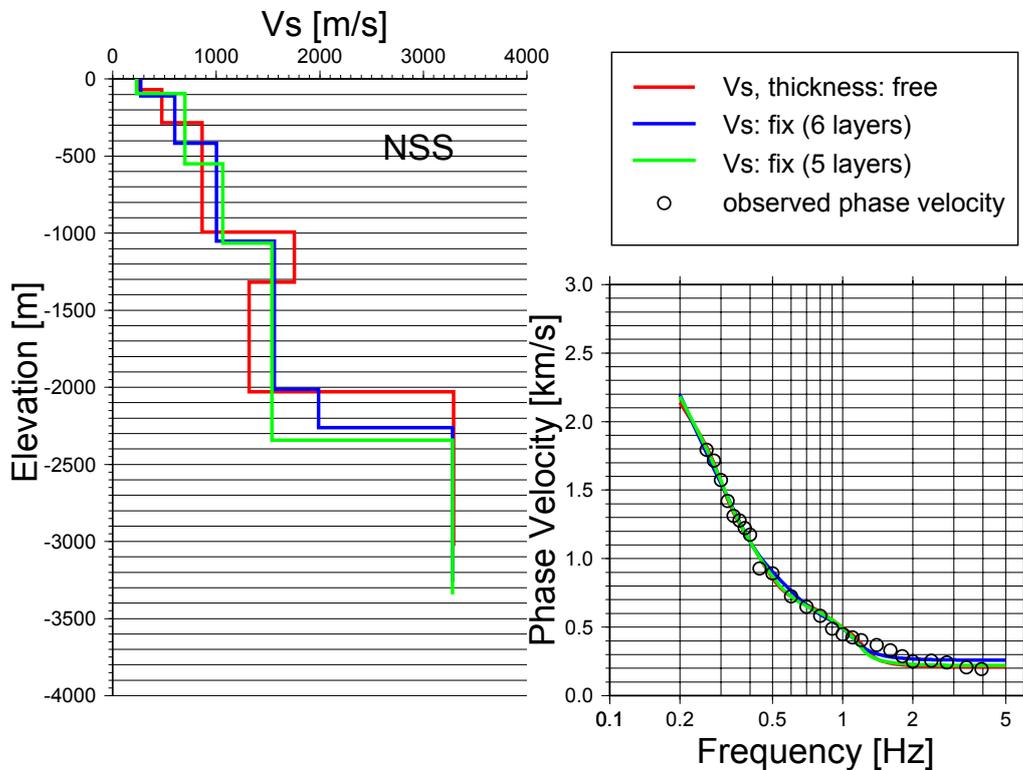
Fig. 12. Fourier velocity spectra of observed microtremor records shown in Fig. 11.



第13図. 観測分散曲線および空間自己相関係数 (白丸は分散曲線の最終解).  
 Fig. 13. Phase velocities and SPAC coefficients of each observation site together with final result of phase velocities (open circles).

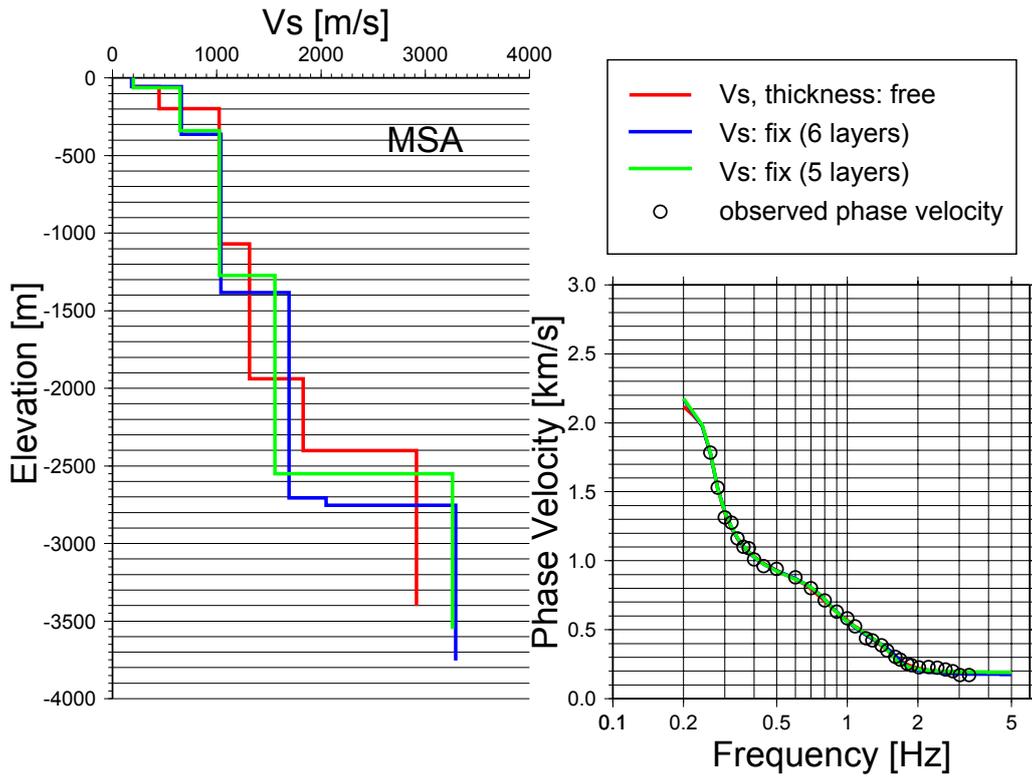


第 14 図. 全観測点の観測分散曲線.  
Fig. 14. Comparison of obtained phase velocities.

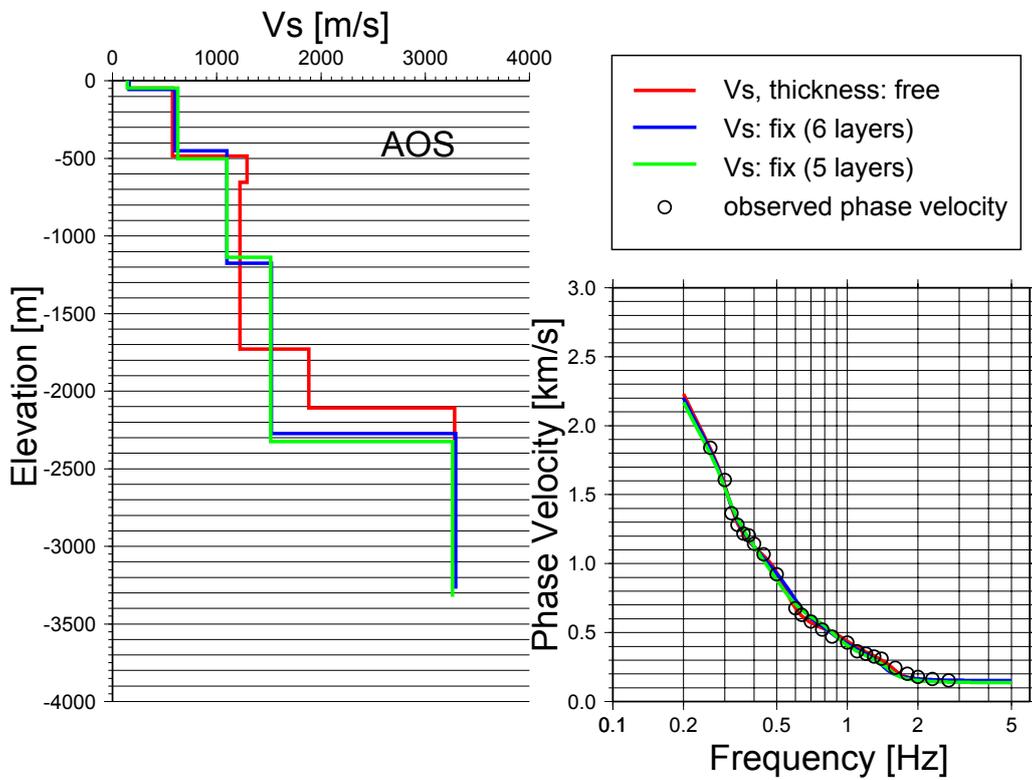


第 15 図. NSS の推定 S 波速度構造 (赤: 第 3 表の探索範囲, 青: S 波速度をほぼ固定した第 5 表の探索範囲, 緑: 第 5 表から第 5 層を除いた探索範囲) (左図) および理論分散曲線と観測値 (白抜き丸) の比較 (赤線, 青線は緑線と重なっている) (右図).

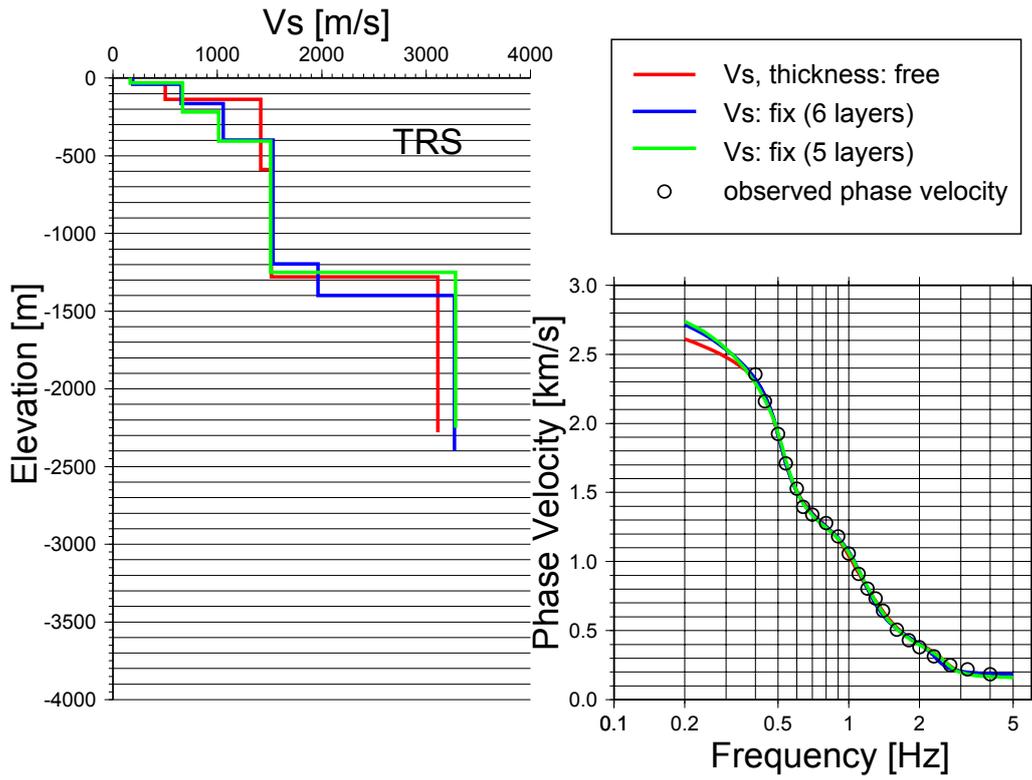
Fig. 15. Results of GA inversion. Left: S-wave velocity structures estimations for NSS site. (red line: with search range of Table 3, blue: with search range of Table 5, green: with search range of Table 5 excluding the fifth layer). Right: Comparison of observed (open circles) and theoretical (curves) phase velocity (red and blue curves are often hidden behind blue one).



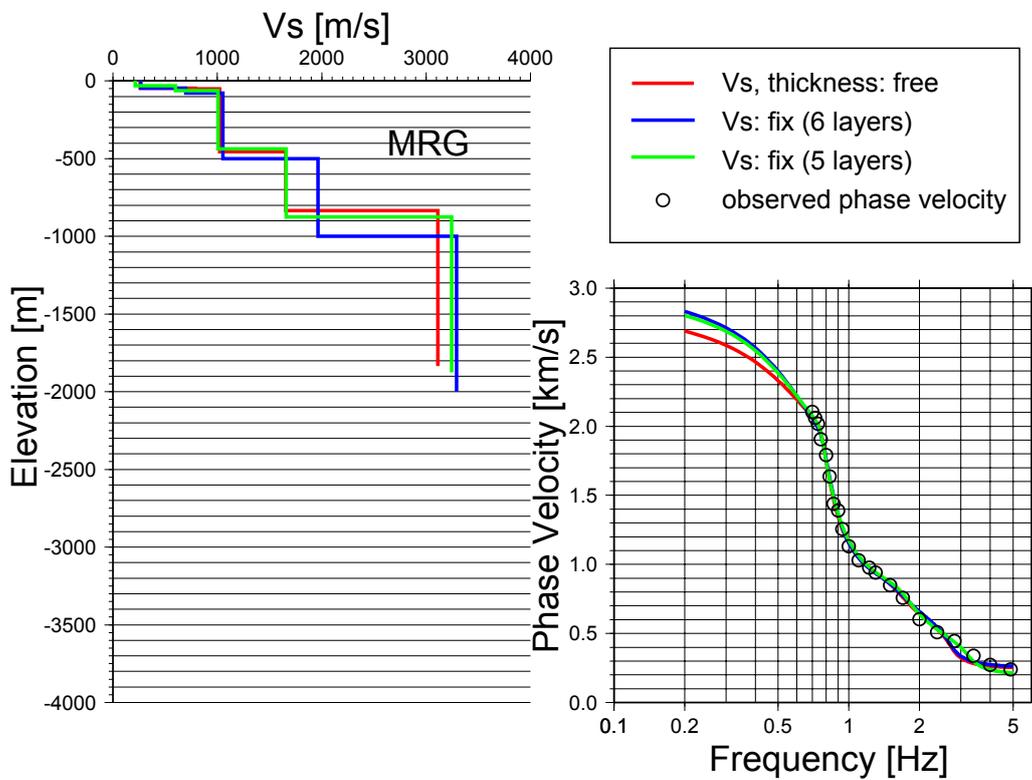
第 16 図. MSA の推定 S 波速度構造 (左図) および理論分散曲線と観測値の比較 (右図).  
Fig. 16. Same as Fig. 15 but for MSA site.



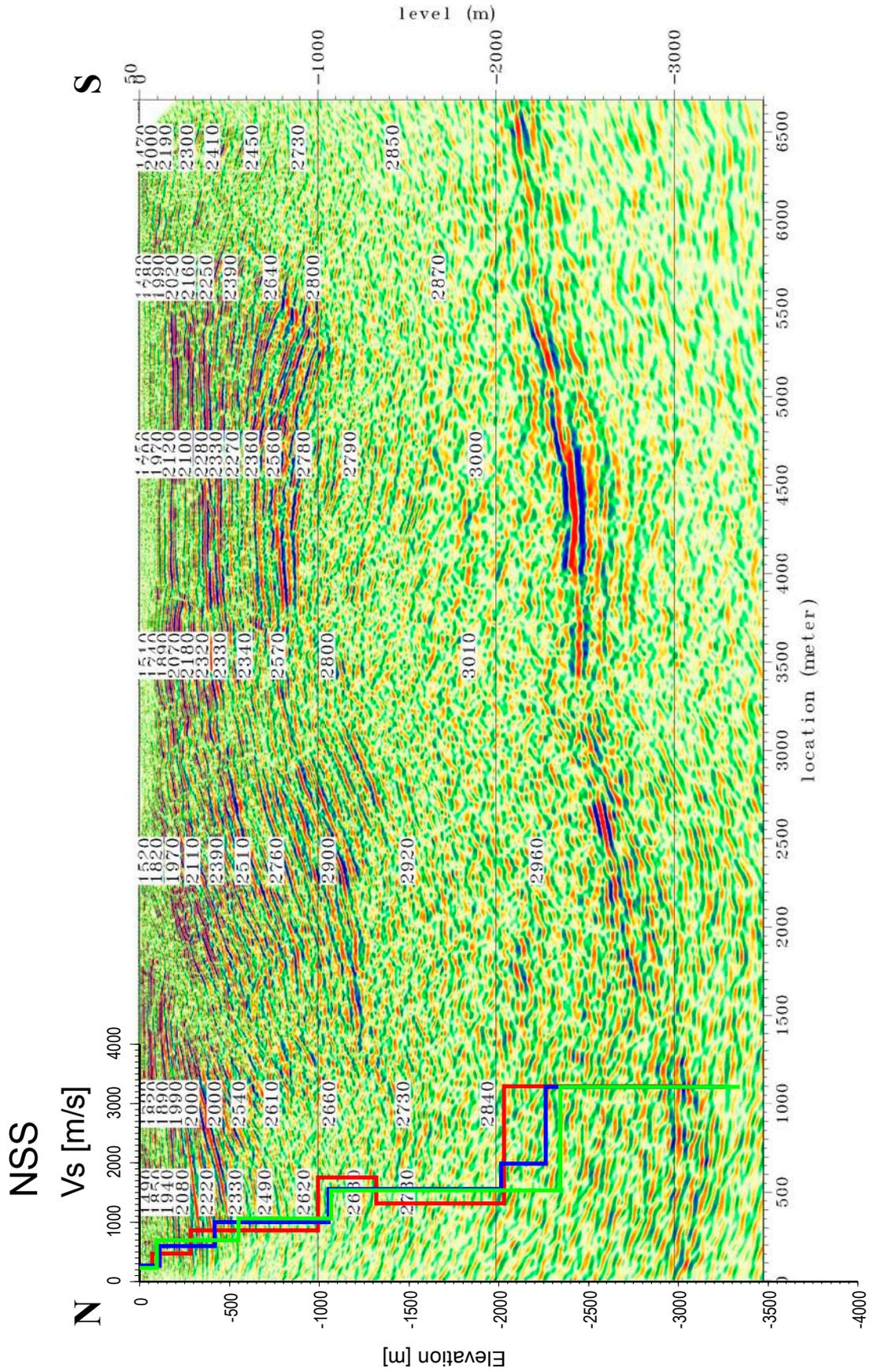
第 17 図. AOS の推定 S 波速度構造 (左図) および理論分散曲線と観測値の比較 (右図).  
Fig. 17. Same as Fig. 15 but for AOS site.



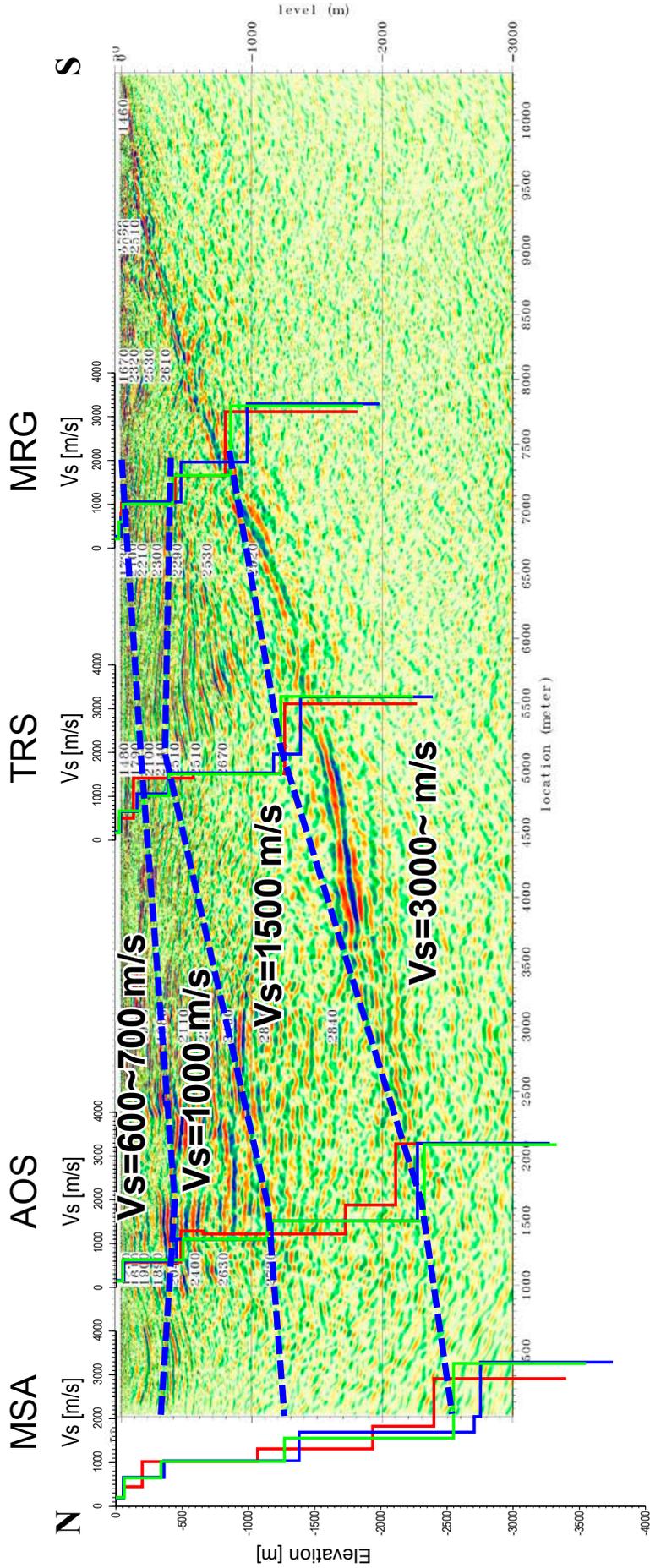
第 18 図. TRS の推定 S 波速度構造 (左図) および理論分散曲線と観測値の比較 (右図).  
 Fig. 18. Same as Fig. 15 but for TRS site.



第 19 図. MRG の推定 S 波速度構造 (左図) および理論分散曲線と観測値の比較 (右図).  
 Fig. 19. Same as Fig. 15 but for MRG site.



第20図. 大分川沿いの反射法地震探査深度断面(吉見ほか, 2007)とNSSの推定S波速度構造(第15図)との比較。  
 Fig. 20. Comparison of the S-wave velocity structure estimation of NSS site with the depth section of reflection survey along Ooita-gawa river  
 (Yoshimi *et al.*, 2007).



第 21 図. 大野川沿いの反射法地震探査深度断面 (吉見ほか, 2007) と本研究の推定 S 波速度構造の比較, および推定される S 波速度構造 (青破線).  
 Fig. 21. Comparison of the S-wave velocity structures estimations and the depth section of reflection survey along Ohno-gawa river (Yoshimi *et al.*, 2007).