

(資料編：本編と区別するために、資料編の図・表はSOOと表記しました)

1 調査の経緯

1-1 ボーリングデータの収集・整理の経緯

1982年に出版された「松本平地盤図」には、松本盆地地域で収集された、およそ300サイトで600本余りのボーリングデータが収録されています。その後「松本平地盤図2000」ではおよそ1,000サイトで1,400本ほどのボーリングデータが整理されました。また平成12~13年に行われた長野県地震対策基礎調査は全県を対象にした調査でしたが、松本盆地地域では400本弱のデータが収集されています。そこでは想定地震による震度を計算する際、「松本平地盤図2000」のボーリングデータと合わせて、1,000本余りのデータがデジタル化されています。

表 S 1 ボーリングデータの提供元

ボーリングデータ提供元	利用したデータ本数
国，独法	113
長野県	640
松本市	111
民間	92
松本平地盤図（1982）	276
松本平地盤図2000	717
web公開データ（KuniJibanなど）	18
合計	1,967

我々のグループは、上記1,000本余りのデータも含めこの2年間、松本盆地地域でおよそ3,700本のボーリングデータを収集しました。過去にデジタル化されていたデータ、2種類の松本平地盤図、新たに収集したデータには重複データも多数存在していましたが、それらを精査し取り除いた上で位置データに信頼がおけるものを選定し、松本市域のデータ約2000本を、「揺れやすさマップ」作りに活用しました（表S1、図S1）。

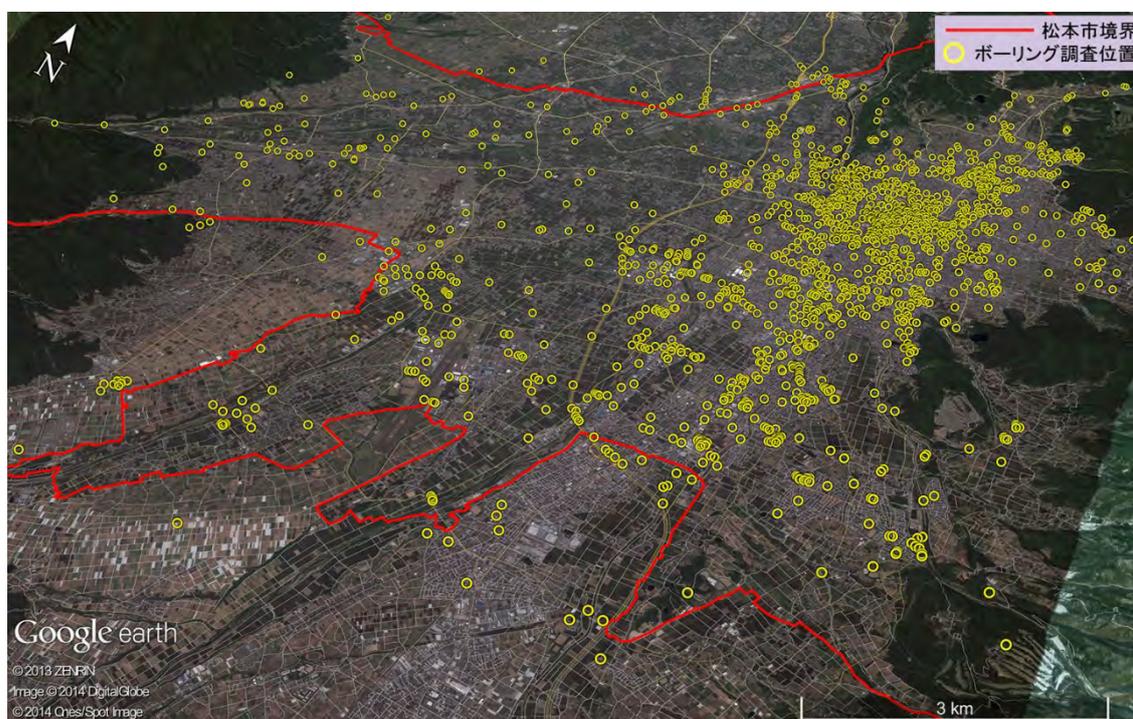


図 S 1 揺れやすさマップ作成のため用いたボーリングデータの分布（鳥瞰図）

1-2 微動アレー探査の準備・実施の経緯

平成 24 年度は、630 松本地震の震央域を東西に横断する測線で 4 点の観測を行いました (D 測線)。

4 点のうち西側の 3 点は 630 松本地震の震央域近傍で設定し、東側の 1 点は松本盆地東縁にあたる牛伏川西側で設定しました。設定は航空写真を用いて住宅など建築物の少ない水田や広場など、測量や地震計の設置しやすい場所の絞り込みを行い、現地視察を行って探査地点を決定しました。現地視察の後、管理者、地権者や耕作者の特定を行って、探査作業の理解を取り付けましたが、事前の現地視察、地権者もしくは耕作者への連絡先探索と理解取り付けに約 1 週間を要しました。探査作業自体は 1 地点につき、測量に 1~2 時間、微動観測に 1 時間であり、4 地点の観測は 2 日間で完了しました。

平成 24 年度の探査では、従来断層が知られてない地域で、基盤深度にギャップがある地点が 2 か所で見出されました。特に観測点 MMD-1 と MMD-7 のあいだには 700~800m の差があることが確認されました。

平成 25 年度は、断層と考えられるこのようなギャップの位置を絞り込むことを目的に、D 測線上に 6 地点での観測を加え、さらに、断層の北方延長部を知るために新たな測線 (B 測線 ; 6 地点) を設け探査を実施しました。また、松本盆地東縁断層通過想定位置 (A 測線 ; 3 地点) においても微動アレー探査を実施しました (図 3-5-3a)。さらに B 測線西方延長部にあたる火打岩地点で追加観測を行いました。

地権者の理解を得る作業に時間を要した前年度の経験や、探査地点が大幅に増えたことをふまえ準備を開始しました。学校の校庭などの使用に関しては、教育委員会を通じて探査作業の理解を短時間で得ることができましたが、結局、地権者の理解取り付けには 1 週間以上を要し、探査当日まで理解を得る作業が続きました。地権者の連絡先を探し出すまでに時間を要したものの、探査を行った 10 月には全ての水田は収穫作業を終えており、地権者のほとんどの方から電話や訪問での依頼に対し、測量、地震計設置・観測作業の理解を短時間で頂くことができました。

2 調査データとりまとめの手順

本調査においては、収集したボーリングデータをもとに、5 種類の地盤図 (ボーリング柱状断面図、建築支持基盤深度図、軟弱地盤厚さ分布図、地盤特性図 I・II) と揺れやすさマップを作成しました。これら 6 種類の図のうち、ボーリング柱状断面図のみ、元のボーリングデータから作成しています。その他の図 (地盤平面図) は元のボーリングデータをメッシュ地盤モデル (方形の区画 ; マス目地盤モデル) として加工したデータから作成しました。

2-1 地盤図と揺れやすさマップ作成の準備

2-1-1 個々のボーリングデータのデジタル化

収集したボーリングデータは、標題情報と位置情報から Google Earth 上で重複データのチェックを行い、その後デジタル化作業を実施しました。デジタル化は、国土交通省

により「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」で定められたボーリング交換用データの形式 (xml ファイル形式) で作成しました。なお、ボーリングデータに関する処理作業には独立行政法人 産業技術総合研究所で開発されたボーリング柱状図入力システム (AIST-Borehole Log Editor)、「ボーリングデータバージョン変換システム(AIST/NIED-Borehole XMLversion Conversion)」、「ボーリングデータ XML 変換システム (AIST-Borehole XML-CSV Conversion)を使用しています。

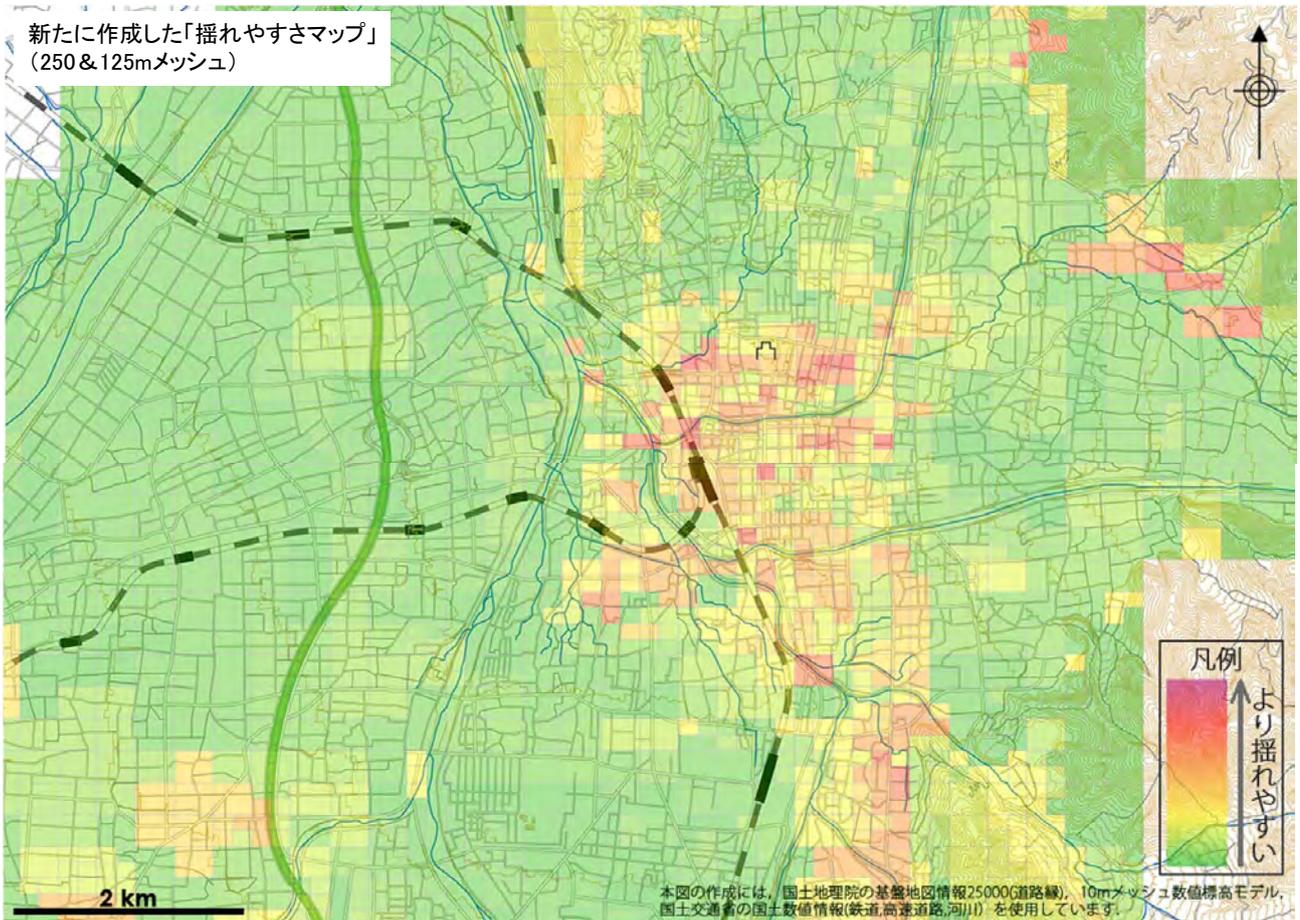
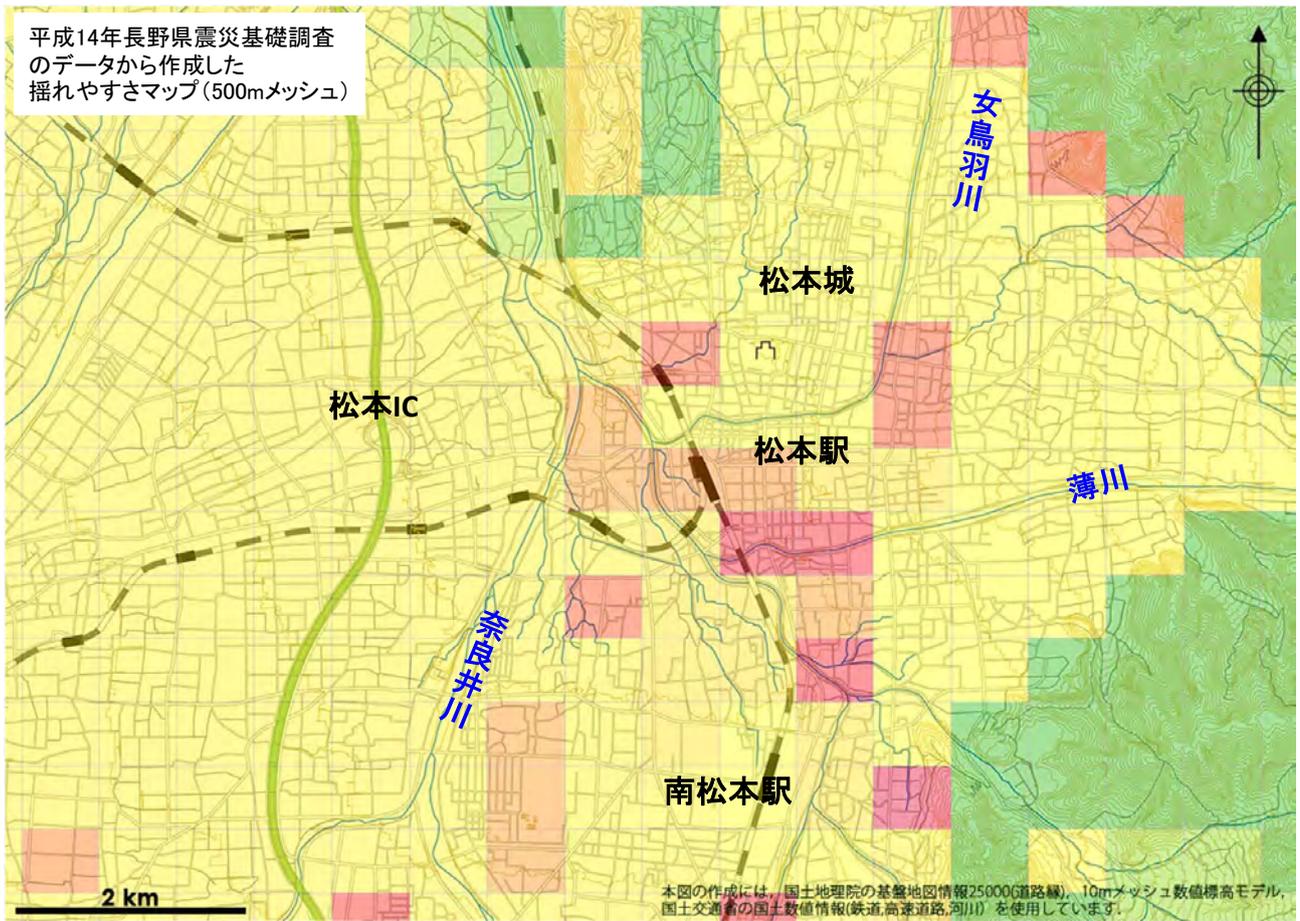
2-1-2 ボーリングデータのマッピングと断面図化

デジタル化したデータを登録、整理した「地盤情報活用システム Pro」(ジーエスアイ株式会社)は、ボーリングデータを一元的に管理できる web システムで、登録されたデータは地図上に表示され、柱状図の閲覧や、断面図表示が行えます。このソフトを利用してボーリング柱状断面図を作成しました。断面図で現れる地形面の描画には、国土地理院から提供されている 10m メッシュの基盤地図情報数値標高モデルを用いています。

2-2 揺れやすさマップの作成

平成 14 年に公表された長野県地震対策基礎調査報告書では、糸魚川-静岡構造線(中部)を震源とする地震など 6 つの想定地震について、全県での計測震度、液状化危険性、建物被害の 3 種類のマップを公表しています。これらのマップは 500m メッシュ(方形の区画; マス目)のサイズで作成されています。このサイズのマップでは、軟弱地盤が複雑に分布していることが知られている松本市の中心市街地などでは、精度が粗いためきめ細かな震災対策を考える上では不十分でした。そこで、我々は新しい「揺れやすさマップ」を以前より高精度のものとするため、250m メッシュ(分割地域メッシュ, JIS X 0410:2012)を基本とし、ボーリングデータの分布密度、地形などを考慮し、可能な地域では 125m メッシュまで細分し作成することにしました(図 S 2)。

新しい揺れやすさマップは当グループの古本が作成した「地盤の地震応答解析プログラム FDEL」による計算値から作成したものです。計算にはそれぞれのメッシュの代表となる地盤情報(メッシュデータ:構成される複数の土層の層厚、土質、N 値などを数値・記号化したもの)を用いました。



図S2 新旧「揺れやすさマップ」の精度の違い

2-2-1 メッシュ地盤モデルの作成法

I. メッシュを代表するボーリングデータの選択

対象メッシュに複数本ボーリングデータがある場合、基本的には危険度の高い方のデータを選択します。その際メッシュ内、および隣接地域のボーリングデータとも比較し、地形や地質、宅地の分布などにも配慮します。仮に N 値 10 以下の砂質土層を含むボーリングデータと、同じくらいの厚さで N 値が 4 以下の粘性土層を含むボーリングデータがあった場合には、液状化しやすい N 値 10 以下の砂質土層があるデータを採用しています。

II. 採用する土層

まず N 値が測られている層について土質を区分します。土質区分した平均 N 値から S 波速度を求めることになるため、液状化しやすい層、軟弱な層（粘土、シルトでは N 値 4 以下）はできる限り区分しました（区分の詳細は次項）。例えば、砂・粘性土互層（もともとの区分名でも、薄層を一括りにした場合でも）で、N 値が粘性土に関してしか求められていなければ、その互層は「粘性土」として扱うこととしました。

III. 土質区分

a : ボーリングデータの土質区分名を次の 5 種に区分しました（大区分）。

- 1) 粘土（粘土、有機質粘土、有機物混じり粘土、有機質粘性土、有機物混じり粘性土、腐植土など）
- 2) シルト質土（砂質粘土、砂質粘性土、砂混じり粘土、砂混じり粘性土、粘性土、ロームなど）
- 3) 砂質土（砂、粘土他粘性土混じり砂、粘土他粘性土混じり砂質土、シルト質砂 中砂、粗砂、有機質砂など）
- 4) 礫質土（砂礫、**混じり砂礫、**質砂礫、**質礫など）
ただし、砂礫等礫系に区分していても、N 値 ≤ 10 の層については、砂質土とする。
- 5) 岩盤などの堅い層（風化岩、地質名）

ただし泥系（泥岩・シルト岩・凝灰岩）は N 値 > 30 、砂・礫系（砂岩・礫岩・凝灰角礫岩）は N 値 > 50 。

その他、**質 AA、**混じり BB という表現は、基本的にはそれぞれ AA、B B 部分の土質名を元に区分しています。

b : 大区分した土質の N 値からそれぞれの区分を細分（中区分）しました。（岩盤は除く）

1)粘土

- a) N 値 ≤ 4 : 粘土 4
- b) $4 < N$ 値 ≤ 8 : 粘土 3
- c) $8 < N$ 値 ≤ 20 : 粘土 2
- d) N 値 > 20 : 粘土 1

2)シルト質土

- a) N 値 ≤ 4 : シルト質土 4
- b) $4 < N$ 値 ≤ 8 : シルト質土 3
- c) $8 < N$ 値 ≤ 20 : シルト質土 2
- d) N 値 > 20 : シルト質土 1

3)砂質土

- a) N値 \leq 10 : 砂質土3
- b) 10<N値 \leq 30 : 砂質土2
- c) N値>30 : 砂質土1

4)礫質土

- a) N値 \leq 10 : 砂質土3
- b) 10<N値 \leq 30 : 礫質土2
- c) N値>30 : 礫質土

IV. 土質の統合・分割と平均 N 値計算

細分した土質区分をメッシュ地盤モデル用に再編します。基本的には中区分名ごとに平均 N 値を求め、細分した際につけた中区分名の数字を取り去りメッシュデータ用の土質名としました。但し、揺れやすさの計算に効かない薄層（層厚 1m 未満を目安；N 値がある場合もある）や N 値のない層（表土や埋土など）もありますので、これらについては元のボーリングデータに記載された土質名と N 値、近くの別のボーリングデータを参考に上下のどちらかの層、あるいは両方の層に統合し、一括りにしたメッシュ地盤モデルの土質名としました。

また、例えばもとのデータが 1 層の砂礫層とされていた場合でも、N 値が下位から上位に向かって 50 から 5 まで漸減する時、中区分に相当する N 値の変化する深度で土質の細分を行っています。

これら新たに統合、分割した土質名ごとに、平均 N 値を算出し、メッシュ地盤モデルが作成されることとなります。

V. メッシュ地盤モデルの数値データ化作業

xml 化したデータは、「ボーリングデータ XML 変換システム (AIST-Borehole XML-CSV Conversion)」を用いることで、標題情報、土質区分、標準貫入試験などの項目ごとの csv ファイルとして書き出せます。メッシュデータ化を効率よく行うために、まずこれらのデータを独自に編集したデータセットを作成しました。また別に、土質区分を自動で行い、土質の統合・分割を補助し、平均 N 値を自動計算しデータ化するエクセルファイルを作成しました。

これらを用いると、メッシュ地盤モデルデータの作成ができます。

2-2-2 空白メッシュへのデータ割当て

ボーリングデータは、解析範囲内の全てのメッシュに存在はしていませんので、データのないメッシュへは、近隣のメッシュからデータを割り当てました。データの割り当てに際しては、当該メッシュと地盤条件の近いメッシュにあるボーリングデータを選択するために、微地形や過去の土地利用を参考にしました。この作業のため、1m 間隔等高線図 (5mメッシュの基盤地図情報数値標高モデルを使用) と過去の水田分布を表す地図 (明治 43 年測図の旧版地形図) を新たに作成しました。また、治水地形分類図 (国土

地理院)や「松本」地域の地質(5万分の1地質図幅)も参考にして割り当てを行っています。

2-2-3 揺れやすさマップの計算条件

上記の方法でメッシュデータを作成しFDELで計算を行いました。

計算は、震源を特定せず、松本地盤全域をレベル2直下地震(M7.3 兵庫県南部地震相当)で、一様に揺る条件です。この時算出される計測震度は全域で震度6強(6.04)から震度7(6.55)を示す値となりますが、この値はあくまで、地盤の相対的な強弱を知るために行った計算結果で、実際に想定される地震による震度予測とは異なります。

つまり、「揺れやすさマップ」はすべての地盤を同じ条件で揺らした場合の震度分布図なのですが、地盤の強弱が地表の震度と関係することから、地盤の相対的な強弱を表した図となります。

2-3 地盤平面図の作成

メッシュ地盤モデルから平面図として、以下の4種類の図を作成しました。

- 建築支持基盤等深度図(図3-1a)
- 軟弱地盤の厚さ分布図(図3-1b)
- 地盤特性図Ⅰ-表層地盤の種類(図3-3-A~J右上図)
- 地盤特性図Ⅱ-表層地盤の硬軟(図3-3-A~J右下図)

これらの作図に用いたデータは、メッシュ地盤モデル用に加工したボーリング柱状図のデータで、データの位置は代表させたメッシュの中心としています。ボーリングデータのないメッシュは、揺れやすさマップと同じく、割り当てを行ったデータを用いて作図しています。

各図の作成条件は以下のとおりです。

a 建築支持基盤深度図(図3-1a)

図化の条件；建築支持基盤深度とは、構造物(建物や橋脚など)の基礎となる丈夫な地盤が地下のどの深さにあるかを示した値のことです。建築支持基盤は、建築物の重さにより異なりますが、ここでは、礫質土、砂質土でN値30以上(礫質土1、砂質土1)、シルト質土と粘土でN値20以上(シルト質土1、粘土1)の各層の何れかが合計して連続で5m以上に達したものとしました。なお、ボーリング調査の最下位層が礫質土1であった場合、5m未満でもここで言う、建築支持基盤と判定しています。

b 軟弱地盤の厚さ分布図(図3-1b)

図化の条件；軟弱地盤は粘土、シルト質土でN値4以下(粘土4、シルト質土4)、砂質土でN値10以下のもの(砂質土3)とし、前項で定義した建築支持基盤の上位にあるそれらの合計層厚を等層厚線図として表しました。

c 地盤特性図Ⅰ-表層地盤の種類 (図 3-3-A~J 右上図)

d 地盤特性図Ⅱ-表層地盤の硬軟 (図 3-3-A~J 右下図)

これら 2 つの図は、表層の地盤の構成土質とその硬軟を平面的に捉えることを目的として作成した図で、a 図の深度境界 (等深度線) を下じきとしています。

c 図は建築支持基盤の上位に堆積している、粘土、シルト質土、砂質土、礫質土の割合をメッシュ毎に示した図です。d 図は b 図で定義した軟弱土を「軟弱」、礫質土・砂質土で N 値 30 以上 (資料編 2-2-1 で区分した礫質土 1、砂質土 1)、シルト質土・粘土で N 値 20 以上 (シルト質土 1、粘土 1) を「硬い」、その間の各層 (礫質土 2、砂質土 2、シルト質土 2・3、粘土 2・3) を「中間」と分類し、それらの割合を示した図です。

両図にはメッシュを代表するボーリングを選定したメッシュのみ、円グラフを表示しました。円の大きさは建築支持基盤の深度に対応しています (深いほどグラフの円が大きい)。

2-4 微動アレー探査による地下構造解析・地下構造図作成の手順

微動アレー探査は地表面に沿って伝播する表面波 (レイリー波) を使った地震波探査方法の一つで、人工的な震源を使わず、常時発生している自然微動を観測することで地下探査を行う手法です。人工的な震源を用いないため、大規模な油圧震動車 (パイプロサイズ) や爆薬が不要で、また高感度地震計 (設置面積 15cm 四方程度) を 1 地点で 7 台ほど設置しケーブルを接続することで測定ができます。したがって、地権者の理解も得られやすく、探査費用は、他の物理探査法に比して廉価ですむのが特徴です。

地震波の上下方向成分を観測しますが、今回用いた地震計 (佐藤商事 (株) 製の MTK-1V) は、深部探査に適した低周波 (長波長) の感度に優れており、条件を整えば松本盆地において日本海や太平洋岸の波浪による震動を捕捉することも可能です。

観測データからレイリー波の位相速度を算出し、周波数との関係を示した分散曲線を求め、分散曲線を逆解析することにより、観測点直下の平均的な S 波速度構造を求めました。

2-4-1 微動アレー探査の流れ

微動アレー探査・解析は、図 S3 のとおりです。表面波位相速度は、①観測した微動から、②表面波を分散の形 (位相速度-周期の関係) で検出します (観測分散曲線の作成)。

S 波速度構造の推定は、③観測分散曲線に適合する S 波速度構造モデルを逆解析により決定します。

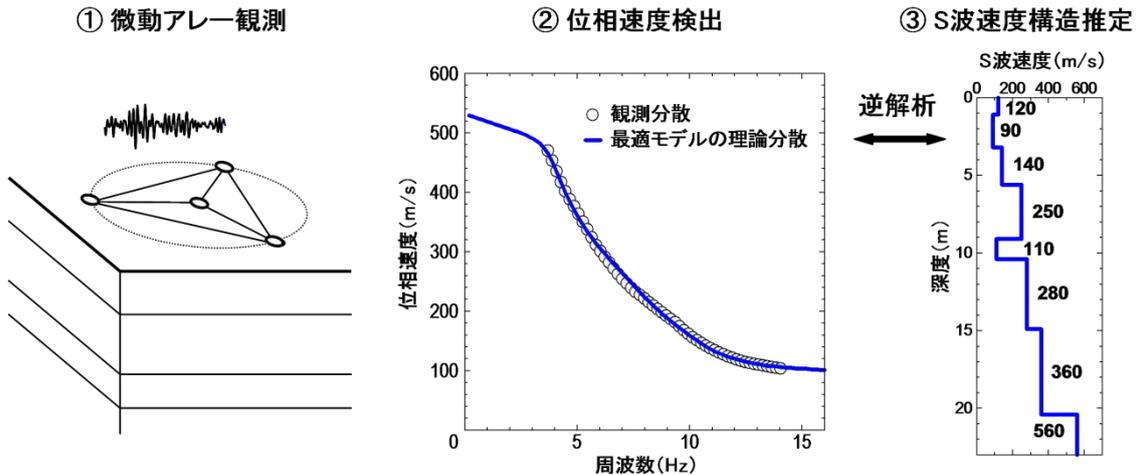


図 S 3 微動アレー探査・解析の流れ

2-4-2 表面波の抽出（分散曲線の計算）

空間自己相関法（SPAC 法）では、アレー中心点と各円周各点間の波形相関性を複素コーヒレンス関数(実部)で表現し、全周平均(方位平均した値)を空間自己相関係数と呼びま

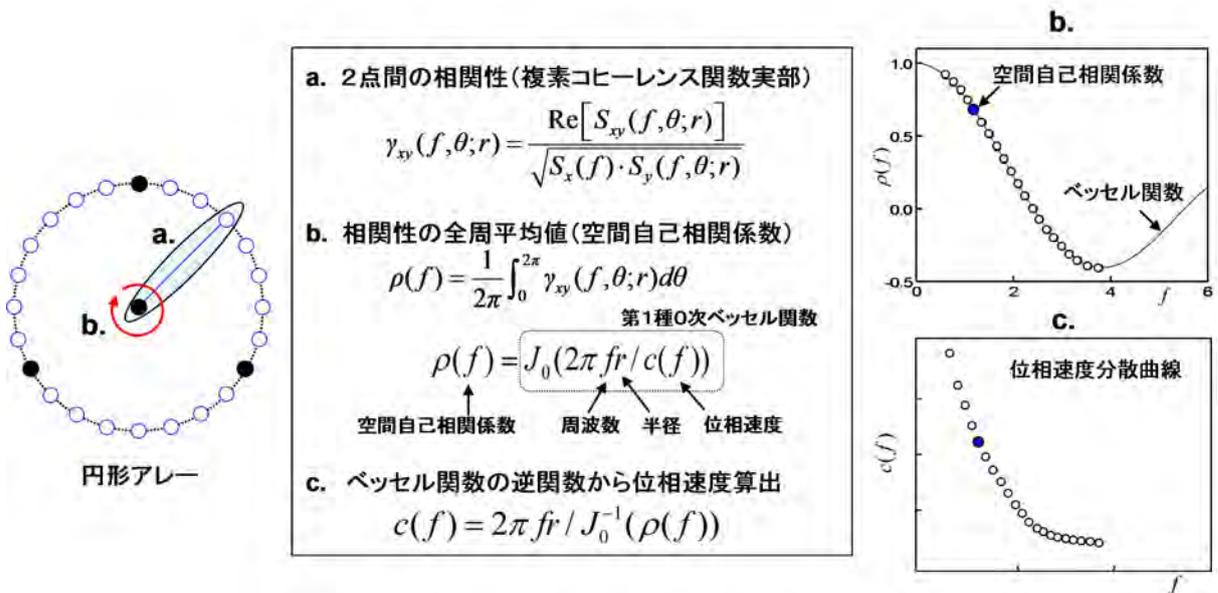


図 S 4 位相速度検出の方法(観測分散曲線)

この値が理論的に位相速度を変数に含むベッセル関数(第1種0次)に等しくなるため、その逆関数から位相速度が計算されます。(図 S 4 に示す)。なお、三角形アレー配置で、表面波の分散特性を抽出できることは、岡田(2001)によって、理論的に証明されています。

2-4-3 S波速度構造の推定(逆解析)

得られた分散曲線を「レイリー波基本モード」の分散曲線とし、アレー直下の地下構

造を多層半無限水平成層構造として推定します。レイリー波位相速度は、層数、層厚、各層のP波速度、S波速度および密度をパラメータとする関数で層数を n とするとき、未知パラメータの総数は $4n-1$ 個となります（最下部の層は半無限層である）。

レイリー波分散曲線の変化に強く寄与するパラメータはS波速度と層厚、特にS波速度であり、P波速度や密度の寄与は、S波速度よりも1~2桁以上小さいことがわかっています。P波速度および密度は既存の統計資料から推定しても、影響は極めて小さく、このとき、未知パラメータ（S波速度および層厚）の個数は、当初の約半分の $2n-1$ 個にまで減少します。

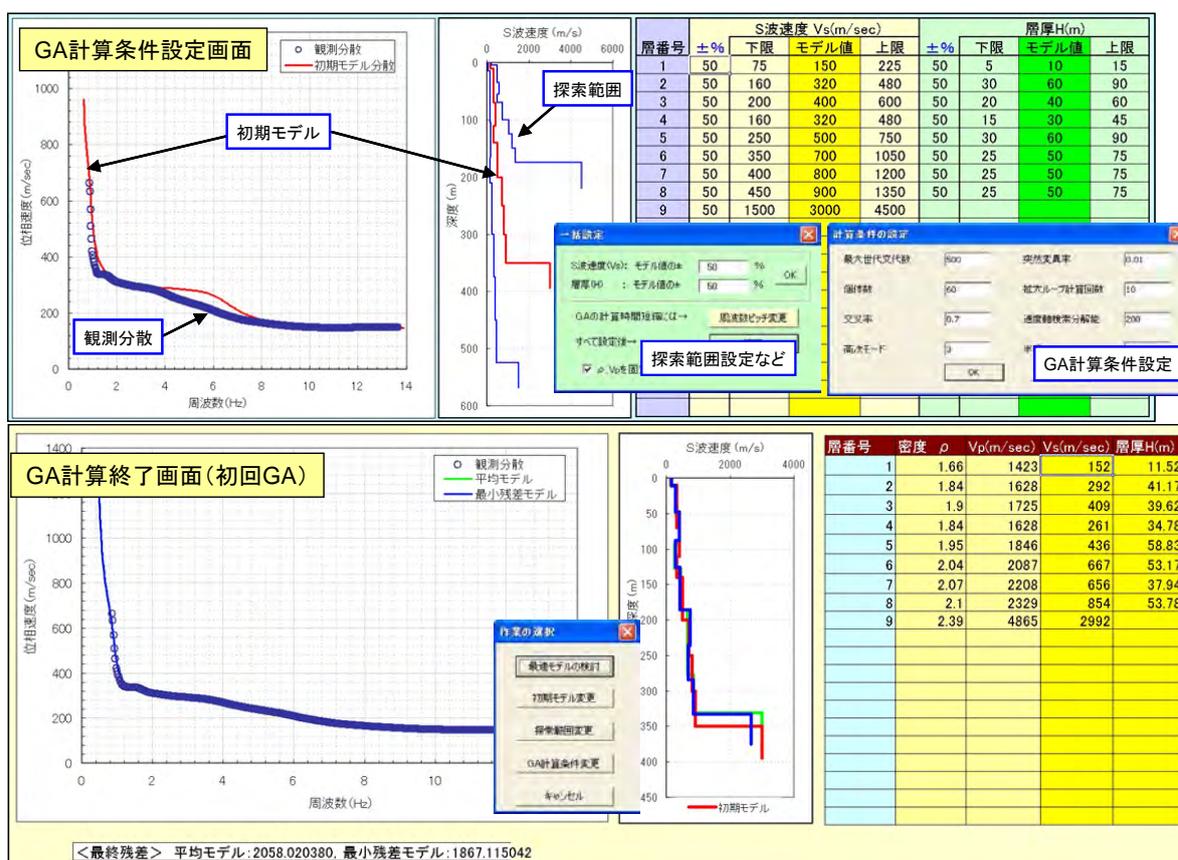


図 S 5 微動アレー探索 解析ソフトの処理画面

本解析では、初期モデルへの依存性を解決する手段として、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm、略称 GA）による地下構造推定法が用いられます。

GA の解析内容を図 S 5 に示します。GA では初期モデルとして層の数、各層の層厚の最大値・最小値、S波速度の最大値・最小値を与え、これらの範囲内で残差最小解を求めますが、GA は順問題という性格上、計算が不安定になる可能性がないなどの特徴を有しています。

初期モデルは図 S 6 に示すように、擬似位相速度断面を作成し速度変化傾向から層厚、S 波速度を仮定し、決定します。

探索範囲、GA 計算条件設定は、作成した初期モデルをもとに、広い探索範囲を設定し、十分の最大世代交代数 (500 世代) で 10 回の GA 計算を実施します (初回の GA 解析)。

初回 GA 計算結果の処置として、10 回の GA 計算結果から、事前情報との適合性など良好な解析結果と判断されたモデルを選択し、必要に応じて再解析を実施することにより最適モデルが決定されます。

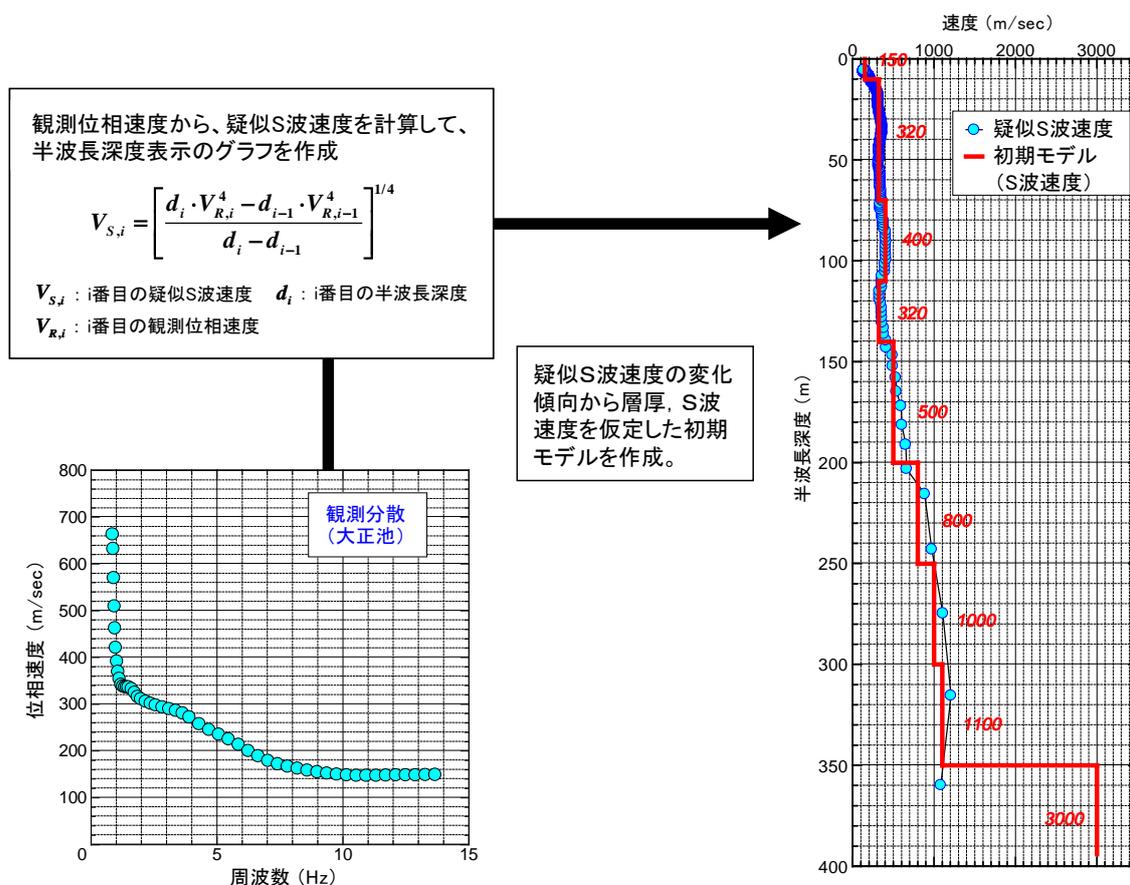


図 S 6 解析での初期モデルの作成手順

2-4-4 チェーンアレー探査

チェーンアレー探査は、地震計を連続的に三角形配置することにより、連続的に分散曲線を得る探査手法です (図 S 7)。

連続した分散曲線から 2 次元の位相速度断面を求め (図 S 8)、断面上の要点で逆解析を実施し、水平方向に展開することにより、S 波速度構造を求めることができます。



MMA-2 においてチェーンアレー探査を実施したのは、地下の S 波速度構造に断層のような不連続がある場合に、その不連続性を検出するのに優れた探査方法であるためです。

図 S 7
チェーンアレー探査における地震計設置状況

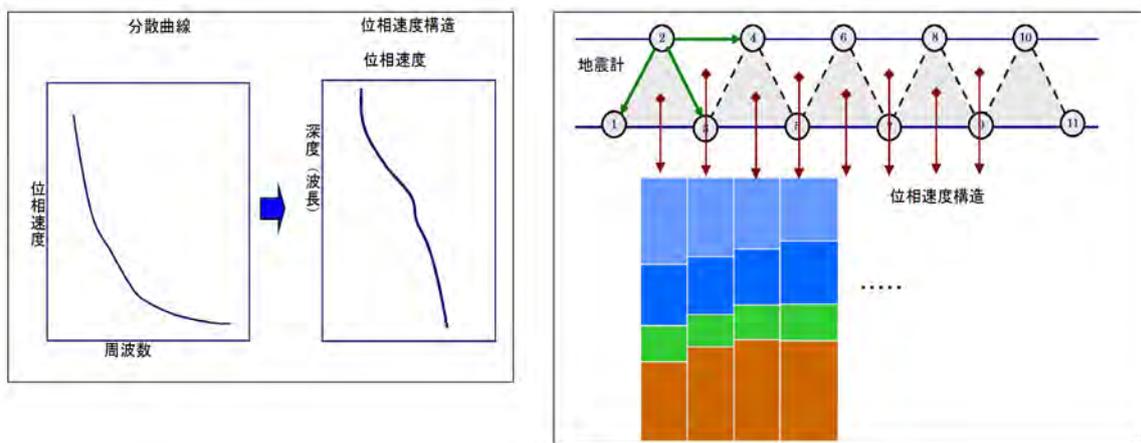


図 S 8 チェーンアレー探査における二次元位相速度解析

3 参考文献（資料編）

- 土質工学会(1968) 土質調査試験結果の解釈と適用例, 土質工学会.
- 国土交通省(2008) 地質・土質調査成果電子納品要領(案), 国土交通省.
- 松岡達郎・白石英孝(2002) 関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性—埼玉県南部地域の三次元 S 波速度構造の推定—, 物理探査, 55, 127 - 143.
- 南雄一郎・松岡達郎・原口 強・元木健太(2011) 微動探査法による大阪平野都市部での深部 S 波速度構造の推定, 応用地質, 52, 192-198.
- 長野県(2002) 長野県地震対策基礎調査報告書, 長野県.
- 岡田廣(2001) 微動アレー観測のための空間自己相関法における効率的な観測点個数に関する検討, 物理探査学会 104 回学術講演論文集, 26-30.
- 大阪地盤編集委員会(1982) 大阪地盤—特に洪積層の研究とその応用, 土質工学会.

信州大学震動調査グループメンバー

小坂共栄（グループ代表・信州大学山岳科学研究所特任教授）

原山 智（信州大学理学部教授）

大塚 勉（信州大学全学教育機構教授）

津金達郎（信州大学山岳科学研究所）

古本吉倫（長野工業高等専門学校教授）

山浦直人（株式会社千代田コンサルタント）

井関芳郎（株式会社サクセン）

小野和行（日本総合建設株式会社）

塩野敏昭（株式会社北信ボーリング）

富樫 均（長野県環境保全研究所）

田邊政貴（長野県）

小松宏昭（長野県諏訪実業高校）

遠藤正孝（長野県松本深志高校）

田中俊廣（長野県岡谷南高校）

著作権等について（お願い）

1. 著作権について

本報告書や松本市ホームページ掲載の松本市の地盤情報は、信州大学震動調査グループによって調査・解析されたもので、その著作権は松本市に帰属します。その内容は日本国の著作権法および国際条約による著作権保護の対象となっていますので、著作権法上認められた「内容についての私的使用又は引用等」の行為を除き、それらを松本市に無断で転載等を行うことはできません。また、引用を行う際は適宜の方法により、必ず出所を明示してください。その内容の全部または一部について、松本市に無断で改変を行うことはできません。

2. 免責事項

松本市は、利用者が報告書や松本市ホームページに掲載された地盤情報等を用いて行う一切の行為について何ら責任を負うものではありません。

3. その他

報告書や松本市ホームページの地盤情報は、予告なしに内容を変更又は削除する場合がありますので、あらかじめご了承ください。

平成24・25年度松本市・信州大学共同事業
「松本市地震動と地盤の相関に関する調査業務報告書」
「揺れやすさマップ」を活かして
地震に備える
—地盤情報から分かる地震時の地面の揺れ—

平成26年7月発行

発行 松本市
〒390-8620 松本市丸の内3番7号

編集 信州大学震動調査グループ（代表 小坂共栄）
〒390-8621 松本市旭3-1-1

印刷 藤原印刷株式会社