

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

信州大学震動調査グループ

信州大学・松本市

ごあいさつ

私たちは、平成 23 年 3 月 11 日発生の東北地方太平洋沖地震、その後の長野県北部の地震、さらには、当松本市におきましても、6 月 30 日に震度 5 強を観測した長野県中部の地震と、相次いで地震災害に見舞われました。

長野県中部の地震は、本市の観測史上最も大きく、局地的には震度 6 弱程度の揺れがあったのではないかとされており、死者（災害関連死）1 名、負傷者 17 名、住家被害約 6,700 棟と計測震度から想定される以上の被害となりました。被害にあわれた皆様には、改めてお悔やみとお見舞いを申しあげたいと存じます。

この地震では震央とされた所から遠い所でも、強い揺れを感じた場所があったり、被害が報告されていることから、松本市の地盤が地震によりどの程度揺れるのかという特性を明らかにする必要があると考え、平成 24・25 年度の 2 年間にわたり、松本市と信州大学との共同事業として「松本市地震動と地盤の相関に関する調査」を進めてまいりました。この間、地盤や地震動にかかわる専門的な調査とその結果の解析は信州大学震動調査グループにお願いいたしましたが、このたびその成果が「松本市の地盤図」、「揺れやすさマップ」などを含む報告書としてまとまったことから、これを公開し、広く市民の皆様をはじめとして、関係各位にご覧いただくことといたしました。

松本市は、牛伏寺断層を含む糸魚川－静岡構造線断層帯の上に位置しており、これに起因する大地震が懸念されている地域です。東北地方太平洋沖地震の例を見るまでもなく、地震は防ぐことはできませんが、事前の対策により、被害を減らすことは可能です。本市としても、今回の成果としてまとめられた「松本市の地盤図」、「揺れやすさマップ」などを基に、地震に強い安全で安心な街づくりを目指し、市民の皆様とともに、着実に防災・減災対策を進めてまいりますので、一層のご理解とご協力をお願い申し上げます。

最後に、本共同事業の実施にあたり、アンケート調査等にご協力いただきました、松本市町会連合会など関係した多くの皆様をはじめ、貴重なデータの提供をいただきました関係諸機関の皆様に厚くお礼を申し上げます。

平成 26 年 7 月

松本市長 菅谷 昭

ごあいさつ

平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震、それに引き続く 3 月 12 日の長野県北部地震、6 月 30 日の松本での地震など、立て続けに発生した地震災害から早くも 3 年が経過しようとしています。松本での地震は、今日では被害の後遺症は跡形もなく消え去り、すでに遠い過去のようにも見えます。しかし東北地方ではいまだに原発事故による放射能汚染から避難生活を強いられている方々が大勢おられます。地震大国である日本に住む私たちは、地震災害への備えを片時も忘れることは許されません。

信州大学や長野高専の研究者をはじめ、地元の教師・専門技術者・行政専門家など多彩なメンバーで構成される信州大学震動調査グループは、630 松本地震の直後から被害調査や震動調査を開始し今日に至っております。この間、大学・松本市をはじめとする関係諸機関、企業、一般市民等からのさまざまな支援を受けながら、単なる震動調査にとどまらず地震時の揺れが地盤と強く関係するとの判断から膨大な量のボーリングデータを収集・解析し、さらには伏在する活断層の位置や規模を明らかにするための地震探査も実施してきました。

今回、それらの調査・解析結果が松本市と信州大学との共同事業の成果として、総合的にまとめられ、「松本市の地盤図」、「松本市の揺れやすさマップ」等として公刊される運びとなりましたことは、まことに喜ばしい限りです。それらの成果が、今後、松本市民の方々の「地震に強い街づくり」に、行政面はもとより市民レベルでも有効に生かされることを心から願うものです。また、それらが糸魚川―静岡構造線に沿う松本盆地に関わる今後の学術的研究の進展にも大きく寄与するものとして期待するところです。

信州大学は、地元にも根を下ろし世界に翔く地域拠点大学として、今後とも長野県の学術・教育・文化・産業などの発展のため、さまざまな面で県民と協働した取り組みに一層の努力を傾注してまいります。

平成 26 年 7 月

信州大学学長 山沢清人

目 次

ごあいさつ

松本市長 菅谷 昭

信州大学学長 山沢清人

1 はじめに	6
2 地震のゆれと地盤	7
2-1 地盤を伝わる地震の波	7
2-2 地盤の性質（固さ・軟らかさ）は揺れ方にどう関係するのでしょうか？	7
2-3 地盤図と揺れやすさマップの果たす役割	8
3 松本市の地盤と揺れやすさの特徴	9
3-1 ボーリングデータ解析による松本市の表層地盤	9
3-2 松本市の地盤図をもとに作成した揺れやすさマップ	10
3-3 地域別にみた松本市の地盤と揺れやすさ	16
3-4 揺れやすさマップと 630 松本地震の震度	41
3-5 微動アレー探査による松本市の地下構造の特徴	44
3-5-1 微動アレー探査の目的と探査地点の選定	44
3-5-2 探査結果のまとめ	45
3-5-3 探査結果に基づいて推定された伏在断層	47
4 松本平とそれをとりまく大地のしくみ	51
4-1 山地の隆起・浸食と堆積作用がつくった松本平	51
4-2 糸魚川―静岡構造線のはしる松本平	52
5 用語解説	53
6 むすび	57
謝辞	57

< 参考 >

・データ提供元	58
・利用データ、ソフトウェア	59
・参考文献	60

資料編

1 調査の経緯	61
1-1 ボーリングデータの取集・整理の経緯	61
1-2 微動アレー探査の準備・実施の経緯	62
2 調査データとりまとめの手順	62
2-1 地盤図と揺れやすさマップ作成の準備	63
2-1-1 個々のボーリングデータのデジタル化	63
2-1-2 ボーリングデータのマッピングと断面図化	63
2-2 揺れやすさマップの作成	63
2-2-1 メッシュ地盤モデルの作成法	65
2-2-2 空白メッシュへのデータ割当て	66
2-2-3 揺れやすさマップの計算条件	67
2-3 地盤平面図の作成	67
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	68
2-4-1 微動アレー調査の流れ	68
2-4-2 表面波の抽出（分散曲線の計算）	69
2-4-3 S波速度構造の推定（逆解析）	69
2-4-4 チェーンアレー探査	71
3 参考文献	72
信州大学震動調査グループメンバー	73
著作権等について（お願い）	73

1 はじめに

平成 23 年 6 月 30 日、松本地方を襲ったマグニチュード 5.4、震度 5 強の地震（本報告書では「630 松本地震」と呼ぶことにします）からほぼ 3 年が経とうとしています。信州大学震動調査グループは、地震に強い松本の街づくりに役立てていただくことを目的に、平成 23～25 年度の 3 年間にわたり 630 松本地震の震動調査、松本の地盤に関する調査などを実施してきました。

松本市南部を震源とした 630 松本地震は、松本市を中心に 6,700 軒を超える家屋に被害を与えるなどした大きな地震でした。全壊した家屋こそなかったものの、多くの住宅で屋根瓦が落下したり、ブロック塀が倒壊するなどの被害がありました。気象庁発表の震度は、松本市役所で計測された震度 5 強が最大とされましたが、実際の被害の程度は震度 5 強では説明できないほど大きなところもありました。その被害分布も、単純に震央から離れるにしたがって少なくなるものでもありませんでした。また、アンケート形式による震動調査から、震度分布図を作成しましたが、ここで明らかになった震度分布も震央からの距離の変化だけでは説明できない複雑なものでした。

松本駅東から並柳地域には軟弱地盤が厚い地帯があり、地震の際の揺れが大きくなるであろうことは、酒井・松本平地盤図作成委員会(2000)によりすでに指摘されていたことです。しかし、630 松本地震で震度が大きかった地域には、上述の文献で指摘された地域も含まれていますが、そうではない地域もありました。そこで震動調査グループは、平成 24・25 年の 2 年間より詳しい地盤の状況を知るためにボーリングデータの収集と解析を行い、さらには地下構造の特徴を明かにするための微動アレー探査を実施してきました。

この報告書は、調査で得られた成果を「松本市の地盤図」、「松本市の揺れやすさマップ」としてまとめ、それぞれについて市民向けに分かりやすく解説を加えたものです。松本市民にとって、この報告書が今後の地震防災に役立つものになるよう願っています。

平成 24・25 年度は、信州大学と松本市との共同事業「松本市の地盤と地震動に関する調査」として実施し、その間には市・県・大学・民間企業等の多くの方々のご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

なお、地盤図や揺れやすさマップに関わる、やや専門的な部分（図の作成手順やデータの扱い方など）などは、末尾に「資料編」としてまとめてあります。また、少しむずかしい用語の解説も掲載しましたので参考にいただけると幸いです。

※ 平成23年度から平成25年度までの調査概要は以下のとおりです。

平成23年度

- 1 松本市内およびその周辺地域の地震による被害状況の調査
- 2 松本市内およびその周辺地域の地震による揺れ方のアンケート調査（約5万件のアンケート用紙配布と2万件の回収）

平成24年度

- 1 アンケート調査結果をもとにした市内全域の震度分布図の作成
- 2 アンケート自由記述欄（約8,000件）の整理・解析
- 3 地盤と揺れの相関を明らかにするためのボーリングデータの収集・整理
- 4 微動アレー探査による地下深部構造調査・解析

平成25年度

- 1 地盤と揺れの相関を明らかにするためのボーリングデータの収集・整理
- 2 微動アレー探査による地下深部構造調査・解析
- 3 ボーリングデータに基づく松本市地域の地盤図作成
- 4 地盤図・地下深部構造データに基づく揺れやすさマップの作成

2 地震のゆれと地盤

2-1 地盤を伝わる地震の波

地震の波は、地下の深いところ（地下深度、数 km～100km 程度）にある震源断層で発生し、地下の地盤を伝わって地表に届きます。

図 2-1 は、地震波が地下の地盤を伝わって地表に伝わる様子を模式的に表しています。①震源断層で発生した地震波は、②固い地層（工学的基盤、あるいは後述の建築支持基盤と考えられる地層）まで伝播し、③表層のやや軟らかい堆積地盤の中を、反射と屈折を繰り返しながら、地表へと到達します。この地表の地震波が、いわゆる地震による地盤の揺れ

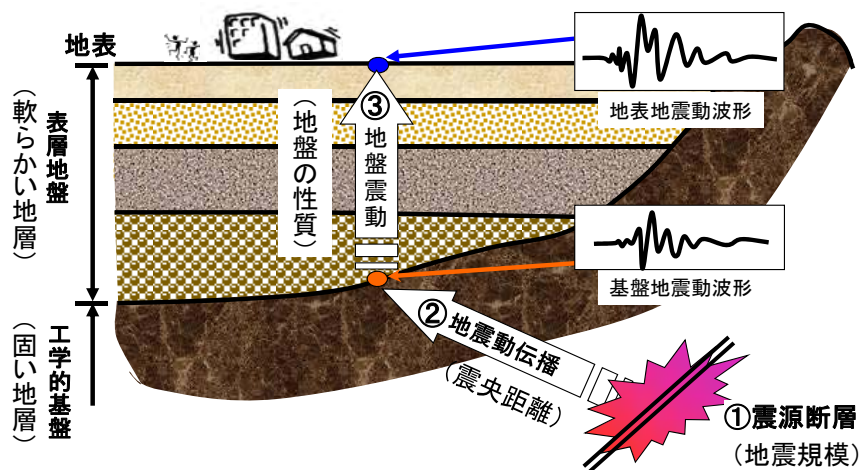


図 2-1 地盤を伝わる地震の波（岐阜県, 2002 に修正・加筆）

となるのです。一般に、震源断層が長く大きいほど、地震の規模（マグニチュード）は大きくなります。また、震源から工学的基盤までの距離（震央距離）が近いほど、地盤の揺れ（地震波の振幅）が大きくなります。

地表の揺れの大きさ

の目安は、気象庁が発表する震度階級により知ることができ、地震発生直後に震度速報が発表されるシステムが現在構築されています。

2-2 地盤の性質（固さ・軟らかさ）は揺れ方にどう関係するのでしょうか？

地盤の揺れは、物理学では逆さ振り子（図 2-2）に例えられます。逆さ振り子は、オモ

リの下に垂直にバネが付いていて、バネはその下の固い板に固定されています。そして、この板をゆするとオモリが揺れる仕組みです。さて、強さの違うバネを持つ二つの逆さ振り子を同時に揺ると、揺れ方にどのような違いが生じるでしょうか？

固い板をゆっくり揺ると、短くて硬いバネを持つ逆さ振り子は小さく揺れ、長くて柔

らかいバネを持つ逆さ振り子は大きく揺れるはずです。ここで用いられる固い板を工学的基盤、長い逆さ振り子を軟らかい（軟弱）地盤、短い逆さ振り子を固い（堅固な）地盤とみなすことができます。

要するに、軟らかい（軟弱）地盤では、地震による揺れが大きくなる場合が多いのです。一般に、地盤は深度が深くなるほど固く締まっていますので、地表のごく浅いところの地盤の性質が揺れの大きさに効いてくることになります。

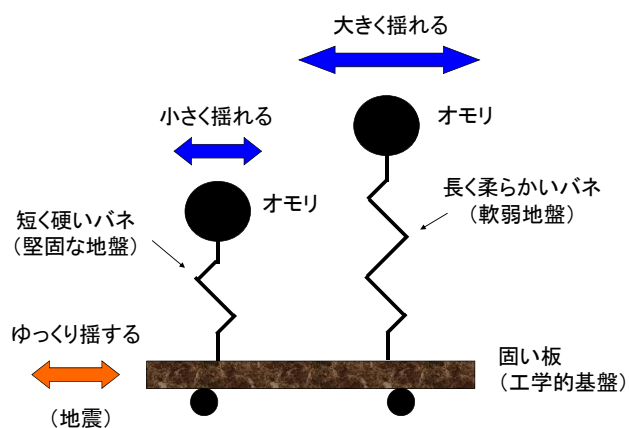


図 2-2 バネの強さが違う二つの逆さ振り子

2-3 地盤図と揺れやすさマップの果たす役割

2-1 や 2-2 で述べたように、地震の際の地盤の揺れ方は、その場所の地盤の性質に左右されますが、特に表層近くの地盤が軟らかいか、固いか、が大きく関係しています。そこで私たちは、630 松本地震の教訓を生かし、地震に強い街づくりに役立ててもらうために松本市内でこれまでに掘削されたボーリングのデータをできるだけ集め、それをもとに地表近くの地盤の状況を、ボーリング柱状断面図・建築支持基盤深度図・軟弱地盤の厚さ分布図などからなる「松本市の地盤図」を作成しました。これらの図の作成に使用したボーリング本数は約 2,000 本にも達します。

これらの地盤データをもとに、「揺れやすさマップ」を作成しました。地震の際の揺れ方が地盤の性質（固い地盤か軟らかい地盤か？ 軟らかい地盤がどれくらいの厚さで堆積しているか？）などに強く関係していますので、「揺れやすさマップ」は、地盤の特徴の別の表現でもあるのです。

また、松本盆地がフォッサマグナ西縁の糸魚川 - 静岡構造線に沿う盆地であることから、この断層に関係する伏在断層についての微動アレー探査も実施し、盆地地下の構造について新たなデータを得ました。

現在、橋や道路、ビルなど、構造物の基礎設計に関しては耐震基準が厳しく定められています。そしてそれに関して正確な地盤のデータが必要とされています。また、地震による都市災害をできるだけ軽減するために、地盤データにもとづいた震度予測図（揺れやすさマップ）を作成し、それを基に防災対策を策定する行政機関も次第に増えてきました。今回作成した地盤図や揺れやすさマップが、「地震に強い街づくり」に生かされることを願っています。

3 松本市の地盤と揺れやすさの特徴

3-1 ボーリングデータ解析による松本市の表層地盤

(図 3-1a：建築支持基盤深度図が示す表層地盤の特徴)

建築支持基盤深度とは、ここでは構造物（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だとしてご理解ください。建築支持基盤深度が深い（大きい）ということは、その上に比較的軟弱な地盤が厚くたまっていることを意味しますので、建築支持基盤の深さは、地震の際の揺れやすさの目安になります。

- ・松本駅の東から南東にかけて、建築支持基盤深度が 20m より深いところがあることが分かります。その周辺には建築支持基盤の深さが 10m を超える地区が広がっており、河川の合流域とよく一致しています。
- ・松本城や市役所が位置する大門沢川と女鳥羽川に挟まれた地域（白板、中央、東部地区）には、建築支持基盤の深さが 10～20m の地域が東西に広がっています。
- ・その南の松本駅が位置する女鳥羽川、田川、薄川に囲まれた地域（田川、第 1、第 2、第 3 地区）は、建築支持基盤深度が若干浅い（5～10m）ところもありますが、大半が 10m より深く、20～25m のところもあるなど、松本市全体の中で最も建築支持基盤が深い地域です。
- ・さらに南の薄川と田川が合流する三角形の地帯（鎌田、庄内地区）でも、一部に建築支持基盤の深さが 20m を超すところがあるなど、建築支持基盤が 10m より深い地域が広がっています。
- ・奈良井川と田川に挟まれた田川、鎌田地区でも松南病院より北の地域では所々に建築支持基盤の深さが 10m を超すところがあります。
- ・これらの南東に位置する田川、牛伏川、和泉川に囲まれた地域（庄内地区）と各川沿いの周辺にも建築支持基盤の深さが 10m を超すところがあり、15m 以上のところもあります。
- ・河川の合流域以外では本郷地区（浅間温泉付近）や里山辺地区（美ヶ原温泉付近）で建築支持基盤の深さが 15m を超えています。

(図 3-1b：軟弱地盤の厚さ分布図が示す表層地盤の特徴)

一般的には、建築支持基盤が深い所ほどその上には比較的軟弱な地層が厚くたまっているという傾向がみられます。しかし、建築支持基盤より上の浅い部分の地盤は、比較的軟らかいとは言っても固いものから軟らかいものまでさまざまな地盤（地層）で構成されています。

地盤の評価は「軟弱」・「中間」・「硬い」と 3 つにランク分けできます。図 3-1b は、建築支持基盤より上の比較的軟らかいとされる地盤の中で、とりわけ軟弱な地盤の厚さを合計するとどれくらいになるかを示した図です。このような軟弱地盤が、地震の揺れを

より大きなものにしますし、この中には液状化しやすい性質をもった地盤も多く含まれますので要注意です。

建築支持基盤がそれほど深くなくても軟弱地盤が厚い場合もあるので、そのことにも注意が必要です（例：藤井沢～湯川沿い）。詳しくは図（３－３章の一連の各地の地盤図20ページ～39ページ）をご覧ください。

３－２ 松本市の地盤図をもとに作成した揺れやすさマップ

地盤を構成する地層の粒度・硬さや厚さなどのさまざまな物理的性質が分かると、地震の際にその地盤がどの程度の震度で揺れるかが計算で求められます。「揺れやすさマップ」は、多数のボーリング柱状図が示す地層データを元にして作った松本市のそれぞれの範囲（方形の区画；マス目）ごとの地盤モデルに対して、ある一定の地震の揺れを一様に与えた場合に、それぞれの地域（各マス目）がどれくらいの震度で揺れるかを計算で求めた結果から作られた図です。

図 3-2a（揺れやすさマップ・広域版）は、今回作成した広域の揺れやすさマップです。地図には道路と河川と鉄道が示してあり、その上を色付けされた長方形のマス目で埋めています。このマス目の色のちがいが**揺れやすさの相対的なちがい**を表していて、“**色が濃いマス目ほど地震の際に揺れやすい**”ことを意味しています。色の薄いマス目よりも色の濃いマス目の方が、“**相対的に揺れやすい**”ということです。３－１節で述べた建築支持基盤の深さが深い地域が、揺れやすい地域とおおよそ一致していることが分かります。周辺より色が濃い、すなわち周辺より揺れやすい地域が市内の何ヵ所かにあることがわかります。このような地域では、地震に対する備えがとりわけ大切でしょう。

図 3-2b（揺れやすさマップ・拡大版）は揺れやすい地域の広がり大きい、松本駅周辺から南松本駅の東部にかけての地域を拡大した図です。この地域は“周辺よりも揺れやすい”地域なのですが、揺れやすい地域の中でもマス目の色の濃さには違いがあることがわかります。揺れやすさマップの色は、薄い色から濃い色までコントラストをかなり強くつけています。各色付けは、震源を特定せず、松本市地盤全域を M7.3（兵庫県南部地震相当）で一様に揺らしたと仮定した場合の計測震度（計測震度 6.04（震度 6 強）～計測震度 6.55（震度 7））の違いを色の濃さで表現したものです。色の濃淡の少しの差は地震時の地盤の揺れ方の少しの差だと見てください。したがって、色の濃淡の差はイコール実際の地震時の**安全の差ではない**ということにご注意ください。このマップを見て、自分の家のマス目の色が隣の家のマス目よりも薄いからと言って、即うちは「安全だ」ということにはならないのです。地震に対して「安全」か「危険」かは、地盤のほか建物の構造など多くの要素にも関係しているのです。

補足説明

- ・ マス目の大きさには 2 種類あって、大きなマス目は 1 辺が 250mほど、小さなマス目は 1 辺が 125mほどの長さになっています。このマス目ごとに地盤モデルが割り当てられてい

ます。マス目の大きさは、地盤モデルを作る基となるボーリングデータの1マス当たりの数や、地形などを基準に決めたものです。例えばボーリングデータが少なかったり、地形が単調だったりする場合大きなマス目を採用しています。

- 軟弱地盤が厚く分布している松本駅付近の中心市街地は、実は狭い範囲で非常に変化に富む地層(地盤)の構成になっています。小さな1つのマス目の範囲でも、実際の地盤は複雑なのです。その複雑な地盤を1つの地盤モデルで代表させて「揺れやすさ」を求めているので、1つ1つのマス目は同じ濃さの色で塗られています。しかし、実際には同じマス目の中でも揺れやすさには差があるはずなので、1つのマス目の色は、あくまでもその地域の代表的な揺れやすさの程度を表していると考えてください。

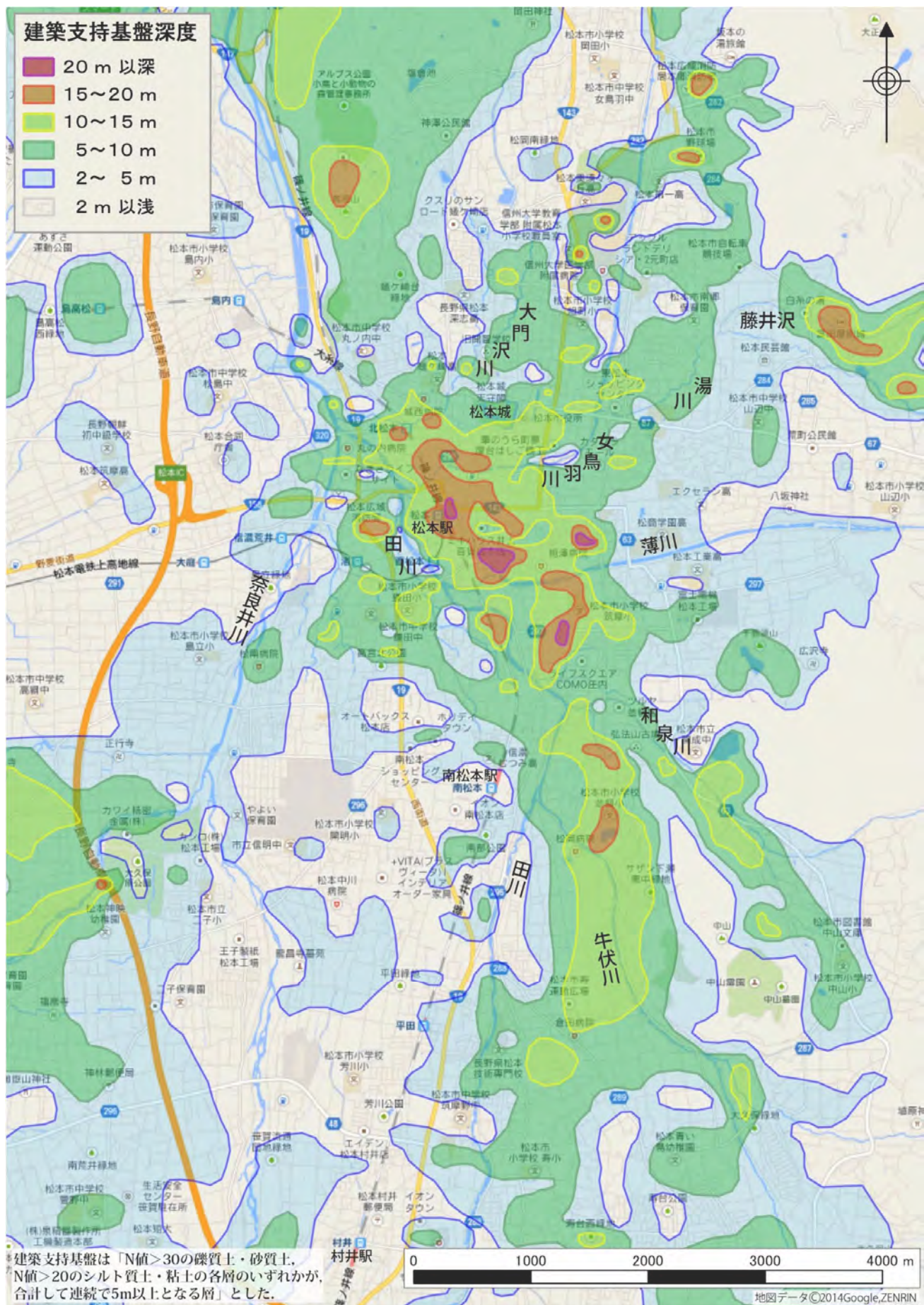


図3-1a 建築支持基盤深度図

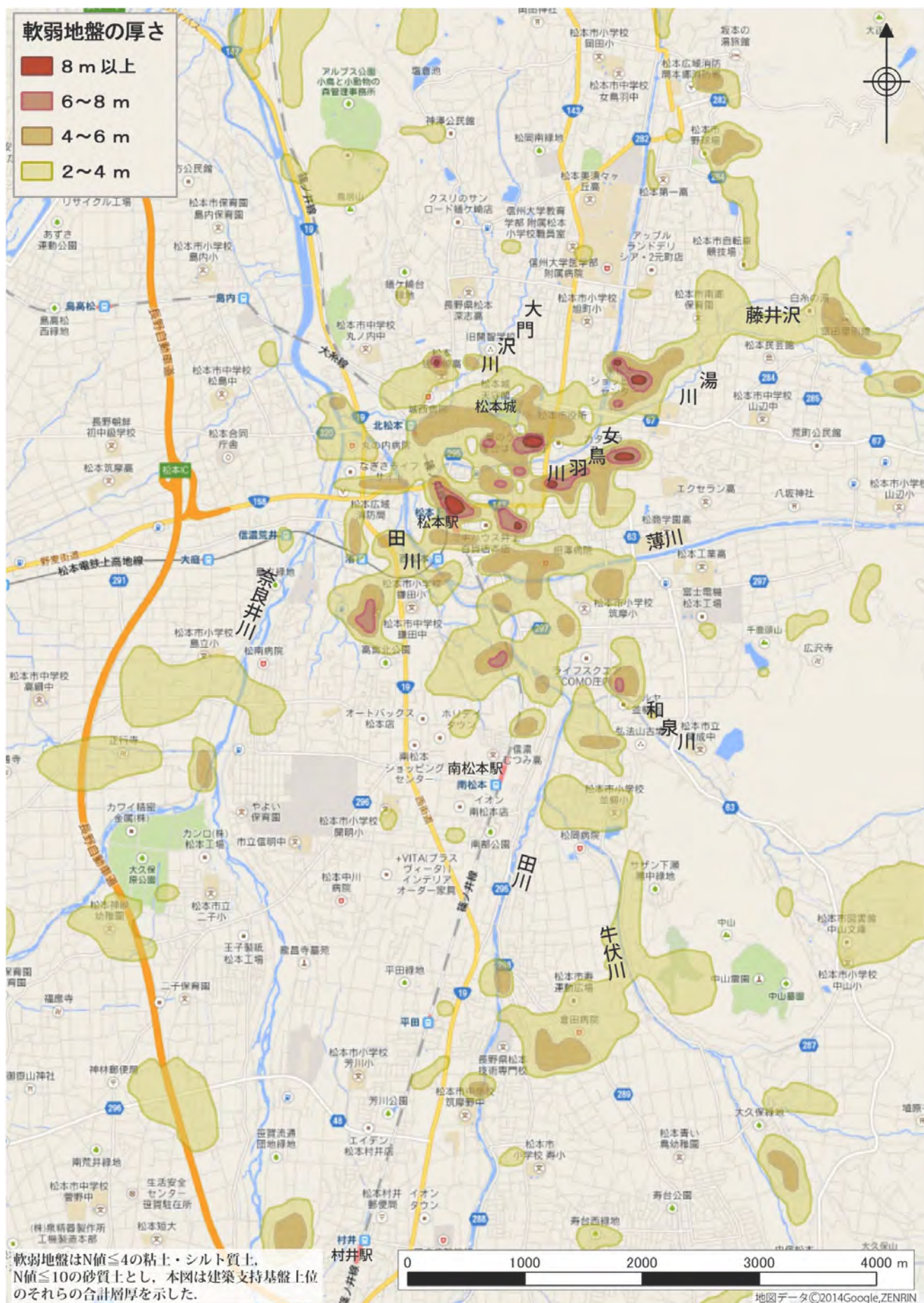


図3-1b 軟弱地盤の厚さ分布図

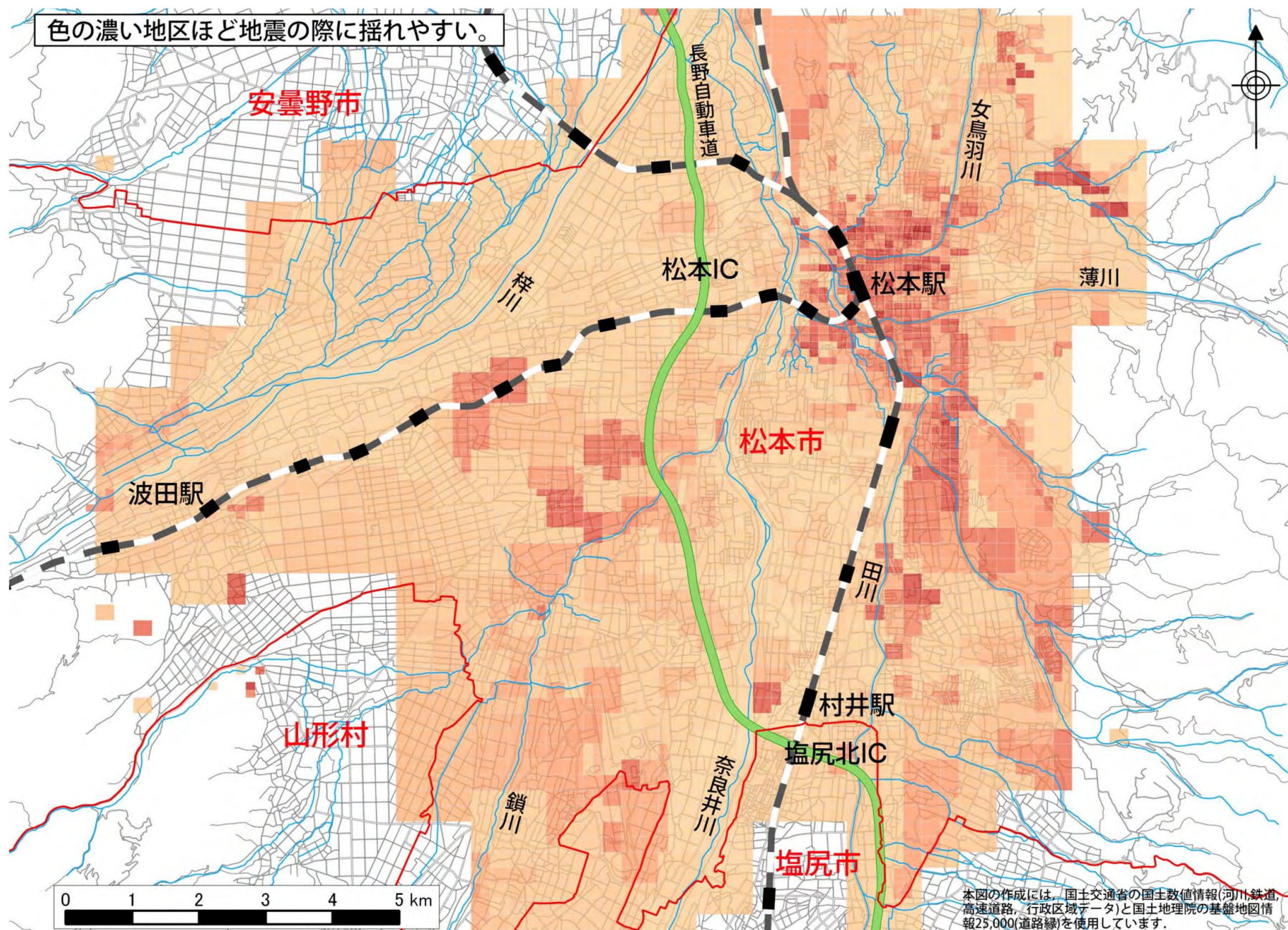


図3-2a 揺れやすさマップー広域版

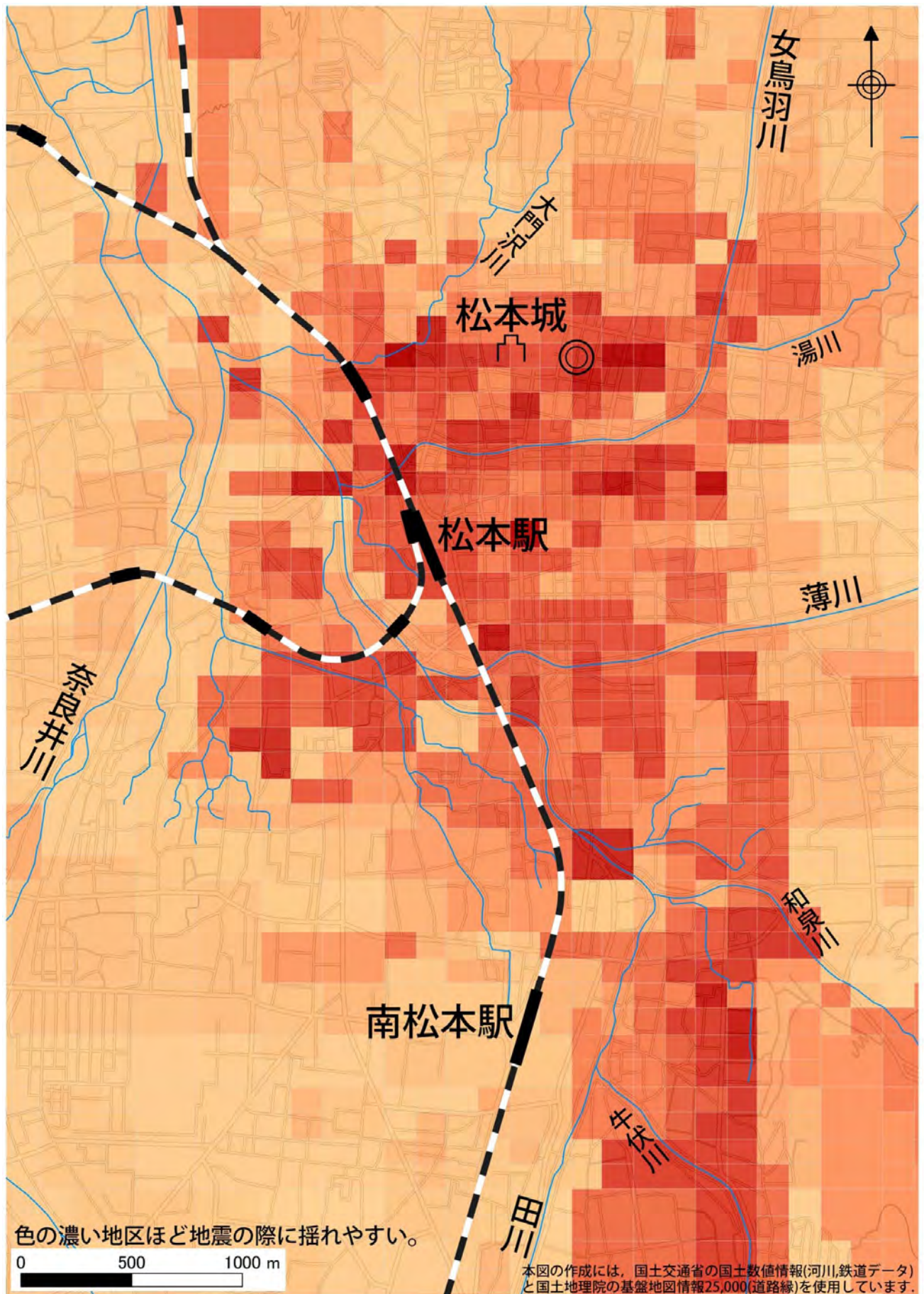


図3-2b 揺れやすさマップー拡大版

3-3 地域別にみた松本市の地盤と揺れやすさ

図 3-3-A~J（揺れやすさマップと各地の地盤）に地域ごとの 3 種類の地盤図と揺れやすさマップの拡大図を示します。 [\[各図へのリンク；A・B・C・D・E・F・G・H・I・J\]](#)

図 3-3 は各地域の図の索引図です。点線は断面図の位置、長方形の枠が拡大した揺れやすさマップと、それと同範囲の 2 種類の地盤図の範囲を示しています。下図は後で述べる地盤特性図 I です。

10 地域について、地域ごとに見開きで 4 種類の図を並べました。各図の読み方について説明します。

① [左ページ上]；揺れやすさマップの拡大図

揺れやすさマップを地域ごとに拡大した図です。道路と建物と河川の詳しい位置の入った地図（松本市基本図）を下図にしています。

② [左ページ下]；ボーリング柱状断面図と断面位置図

地図（上半）部分の丸印は、ボーリングの位置を示し、赤い丸が下の断面図に採用したボーリングの位置です（緑の丸はその他のボーリングの位置）。赤丸に沿った黒の実線の位置を他の 3 図では点線で示し、断面図の位置を参照できるようにしてあります。縦横の青線は約 250m 四方のマス目の境界線です。

下半の図が断面図で、赤丸位置のボーリングデータが、長方形の柱の図（柱状図）として示されています。色と模様は地盤の種類を表していて、凡例は各図に示してある通りです。柱状図の右側の折れ線グラフは地盤の硬さを表す、N 値という値を層ごとに示したものです。左端（柱状図に近い方）が N 値 0 で右端が 50、数字が大きいほど硬い地盤を意味します。

左側の目盛りと数字は標高を表し、赤い曲線は断面線上の地表の凹凸（地形面）です。

柱状図を横切るように書かれた青色の曲線はおおよそその建築支持基盤の位置（深さ）を示しています。

一番下には各地域の地盤、地質の簡単な解説をつけました。

③ [右ページ上]；地盤特性図 I（地盤の種類）

建築支持基盤までの地盤がどのような土質から構成されているかを示した図です。

各色の曲線は図 3-1a（建築支持基盤深度図）と同一のデータですが、範囲を塗りつぶさずに境界線だけにしたもので、建築支持基盤の深さを表しています。

円グラフは土質の構成を示しています。ボーリング柱状図のデータをモデル化し、「粘土」「シルト質土」「砂質土」「礫質土」の 4 種類に再区分したデータを割合として示しています。円グラフの大きさは建築支持基盤の深さを示し、円が大きいほど建築支持基盤が深いことを意味します。赤い小さい丸の地点は建築支持基盤が地表ですので、円グラフを作成することはできません（つまり、地盤がよい地点）。

なお、円グラフと赤丸の位置は、250m ないし 125m のマス目の中心位置であり、もともとのボーリングデータの位置ではありません。また、円グラフも赤丸もない地点は、対応するマス目の範囲にボーリングデータがなかった所です。このような

空白のマス目は、揺れやすさマップの計算の際には、地形、地質状況を考慮し、周辺のデータからふさわしいものを割り当てています。

④ [右ページ下]；地盤特性図Ⅱ（地盤の硬軟）

円グラフは建築支持基盤までの地盤のうち軟弱な層、硬い層がどの程度の割合で含まれているか示す図です。このグラフでの「軟弱」は図 3-1b（軟弱地盤の厚さ分布図）と同じ基準で区分したものです。「硬い」としたものは十分な厚さがあれば建築支持基盤になりうるものです（厳密には、建築支持基盤は作られる建造物などの種類によってその評価基準が多少異なります）。「軟弱」と「硬い」のあいだを「中間」として示してあります。他の凡例などの意味は上図の「地盤特性図Ⅰ（地盤の種類）」と同じです。

補足説明

地域別にみた松本市の地盤と揺れやすさマップの理解を深めるために、以下の説明も参考にしてください。

各図を見比べることによって様々なことが読み取れます。

例えば、図 3-3-A の右下図を見ると、信州大学付属図書館付近にある大きな円グラフの位置では建築支持基盤が 15～20m とかなり深いのですが、揺れやすさマップ（左上図）のこれと同じマス目を見ると、建築支持基盤が深い割には揺れやすくはない、ということがわかります。なぜでしょう？

まえに「建築支持基盤の深さは、地震の際の揺れやすさの目安になります。」と書きましたが、建築支持基盤の深さだけで、揺れやすさが決まるわけではありません。実は、建築支持基盤までの地盤の硬さや種類なども大切な要素となるのです。そこで、この地点の円グラフの構成をよく見ると、4分の3近くが硬い礫質土だということがわかります。このような場合は建築支持基盤が深くても、思ったほど揺れやすくはならないわけです（とは言っても建築支持基盤の上位にはより軟弱な層が厚くたまっていることが多いので、ある程度の広がりをもって見ると、建築支持基盤の深さと揺れやすさはよく対応しています）。お住まいや、学校、会社がある地域が含まれている方は、詳しくご覧ください。

こうして細かく見ていくと、「揺れやすい」とされているマス目にボーリングデータがない、ことが確認できることもあります。このようなマス目は、やむを得ず近隣のデータで補完して表示したものであり、他のマス目に比較し、原位置でのデータによる裏付けが不足しています。その意味では、この「揺れやすさマップ」はこれで完成したものではありません。今後も新たなデータを加えながら改訂していく必要があると考えます。

なお、図 3-3-k は松本市の中心市街地をおよそ北北東・南南西方向に切った断面図です。各地の地盤図と揺れやすさマップ 3～4（図 3-3-C,D）の範囲に含まれる地域の断面図で、松本城や松本駅付近の地下の様子を解説しました。

地域を示すアルファベットをクリックすると、各地域の揺れやすさマップと地盤図のページへ移動します。

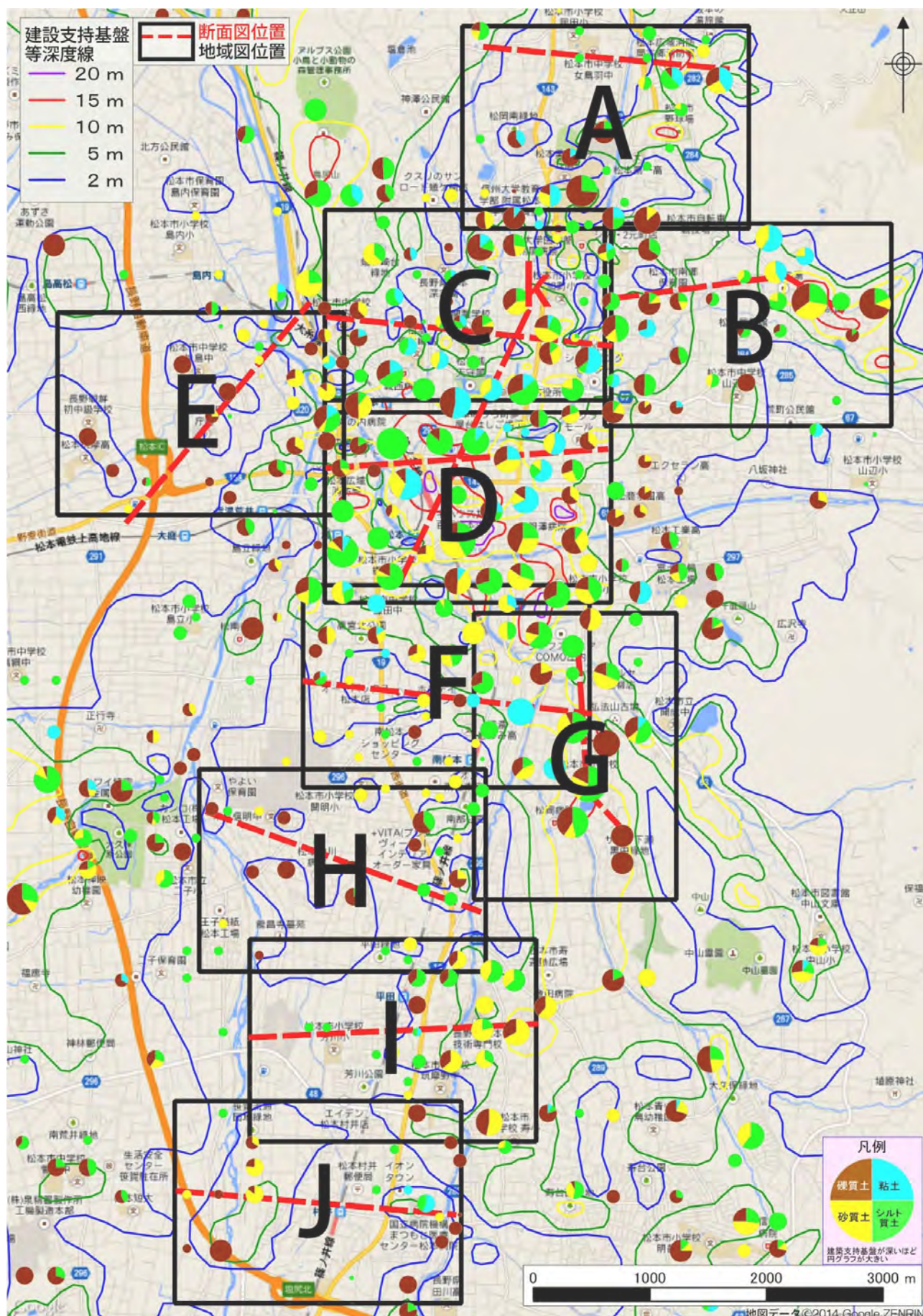
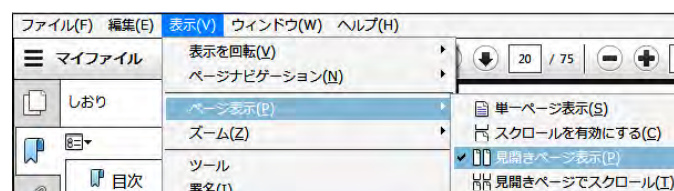


図3-3「揺れやすさマップと各地の地盤」の索引図

地域ごとの図は見開き表示で見ると、各図の比較がしやすいようになっています。Adobe Readerでは右図のように、表示-ページ表示-見開きページ表示で設定できます。



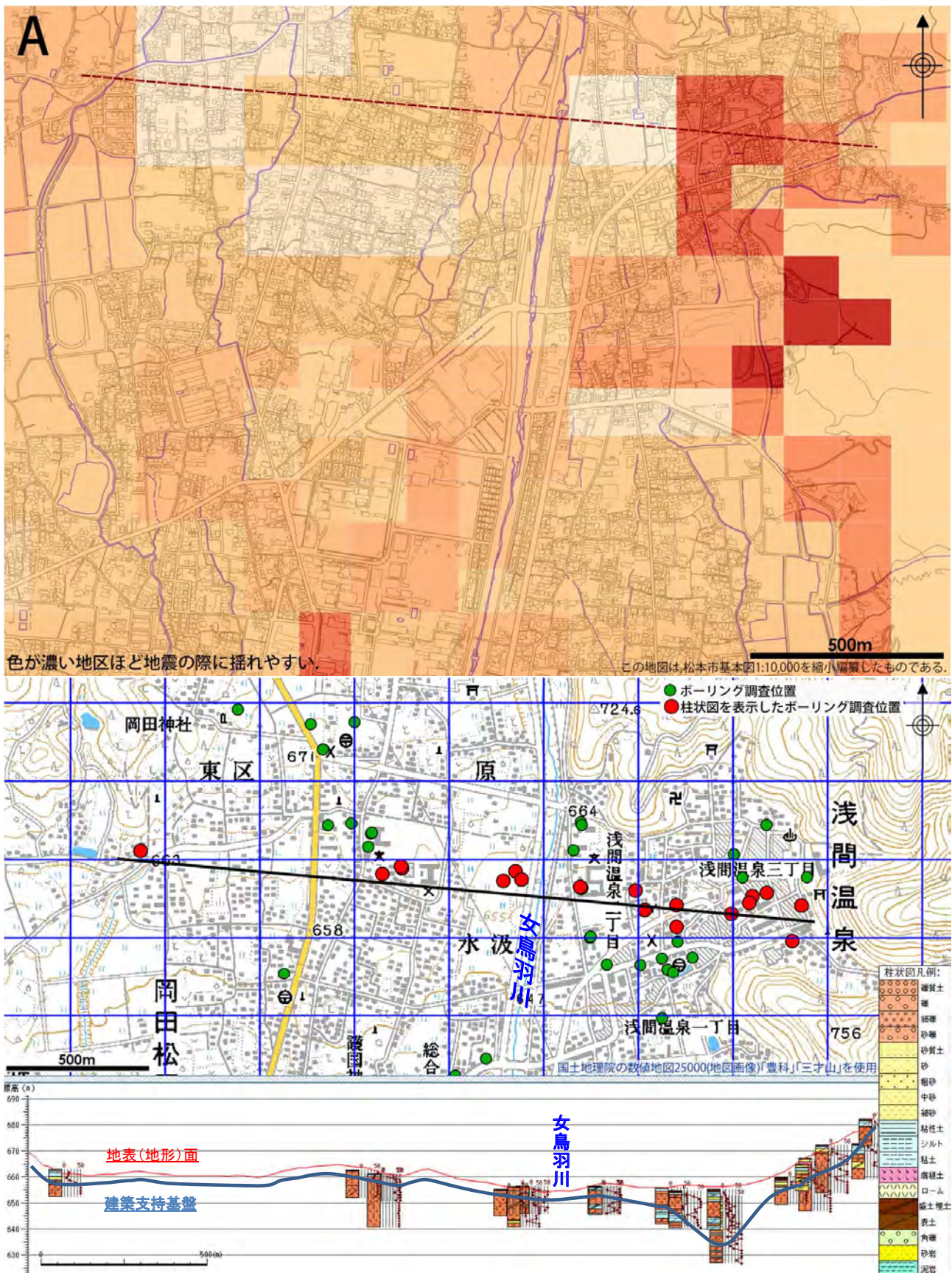
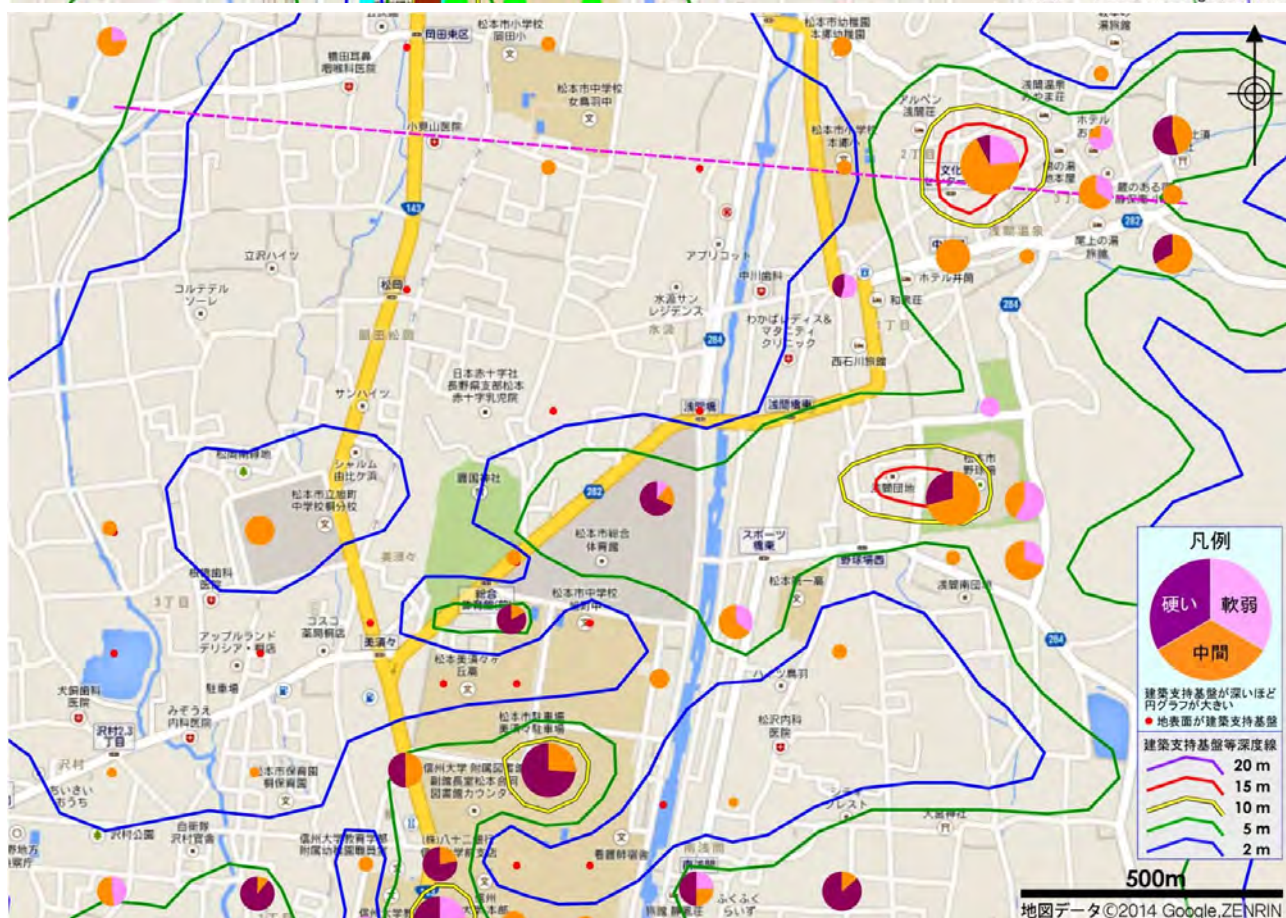
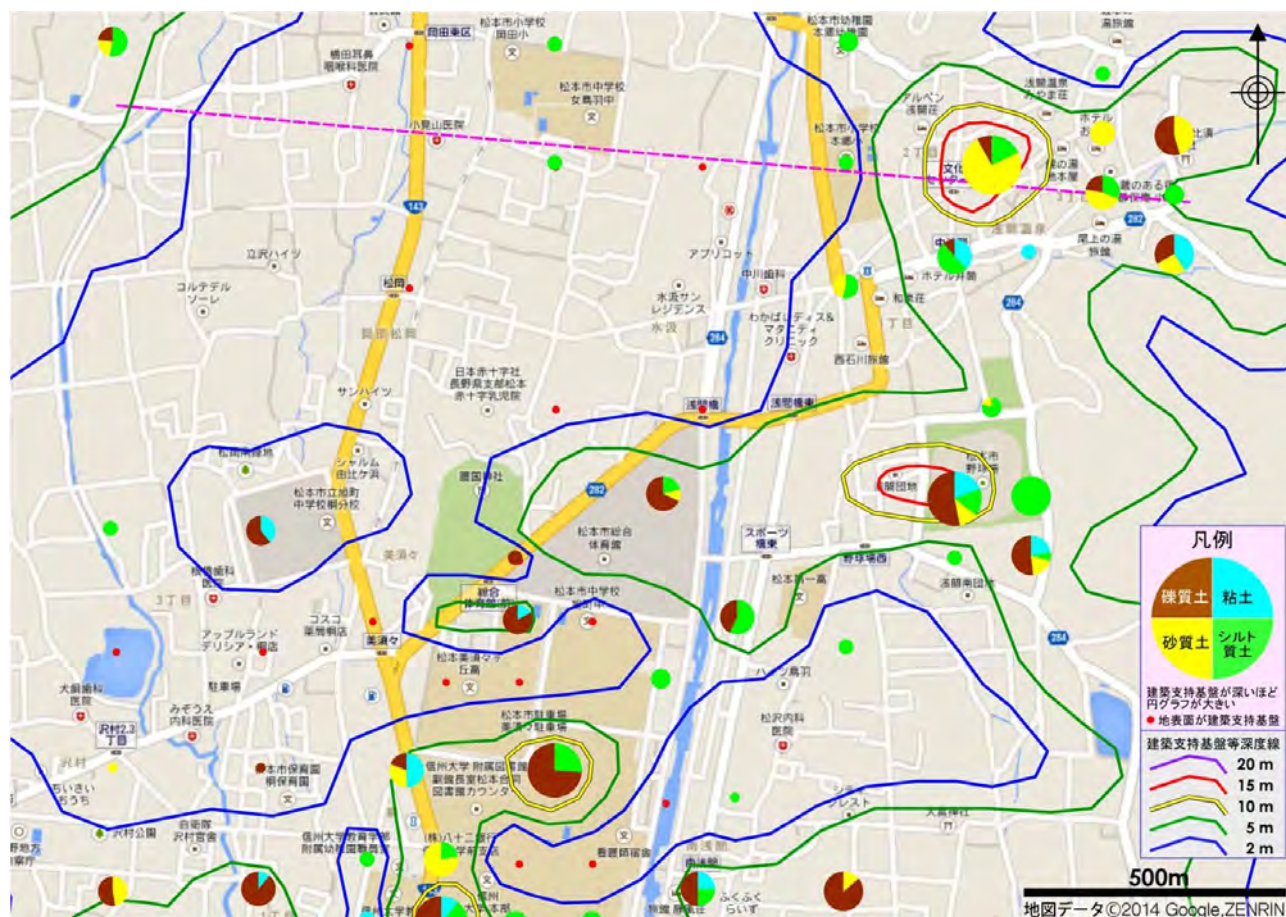
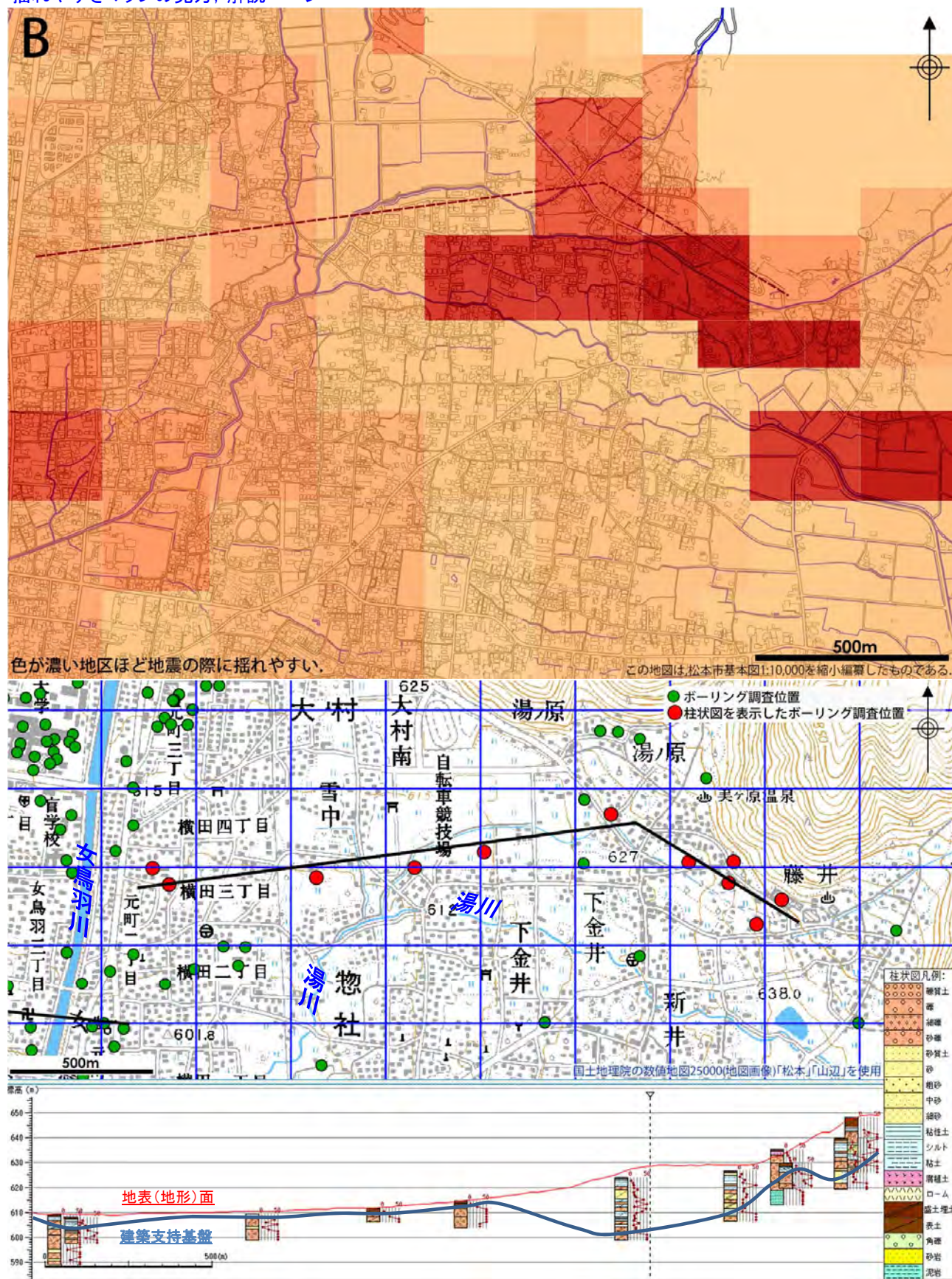


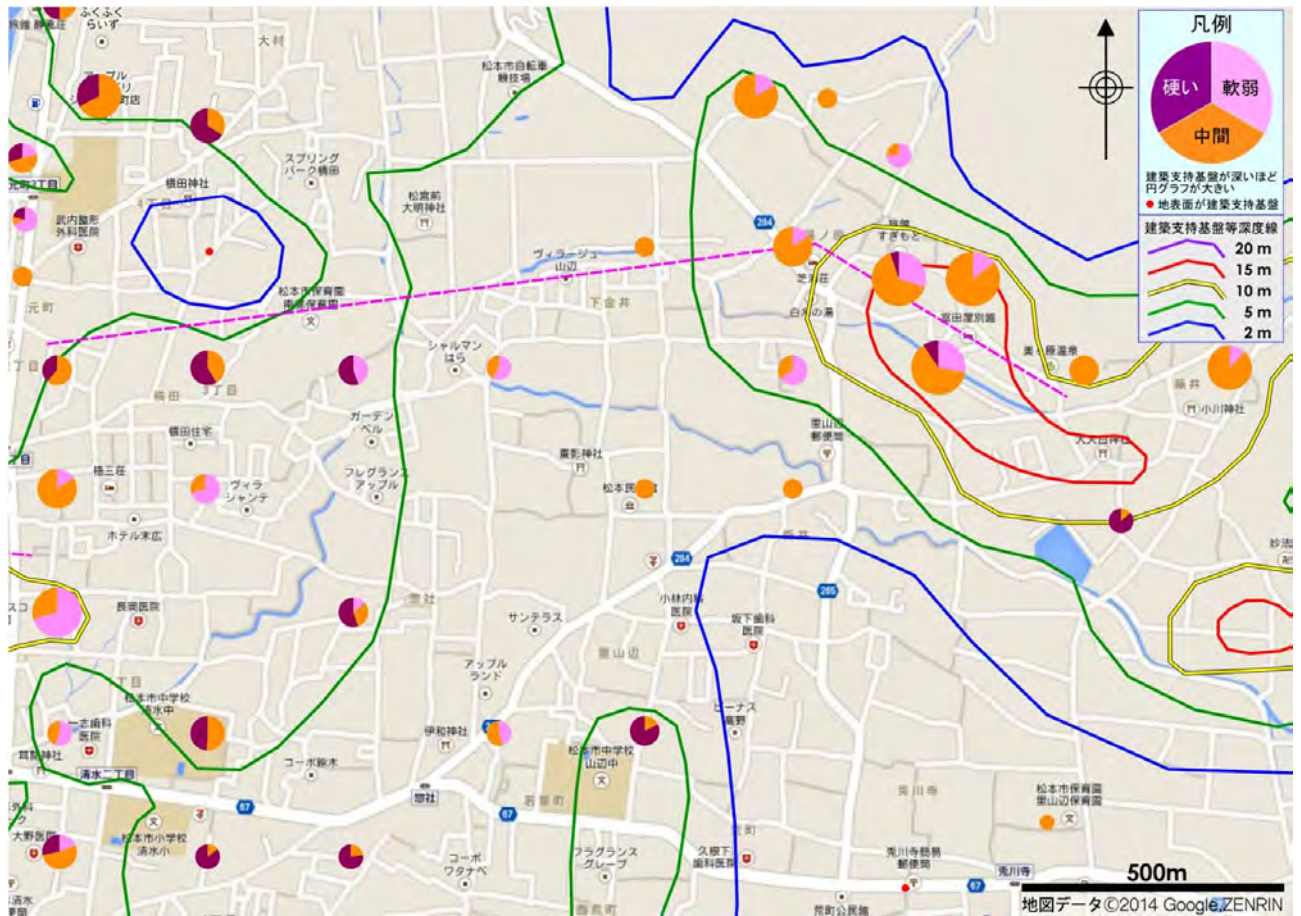
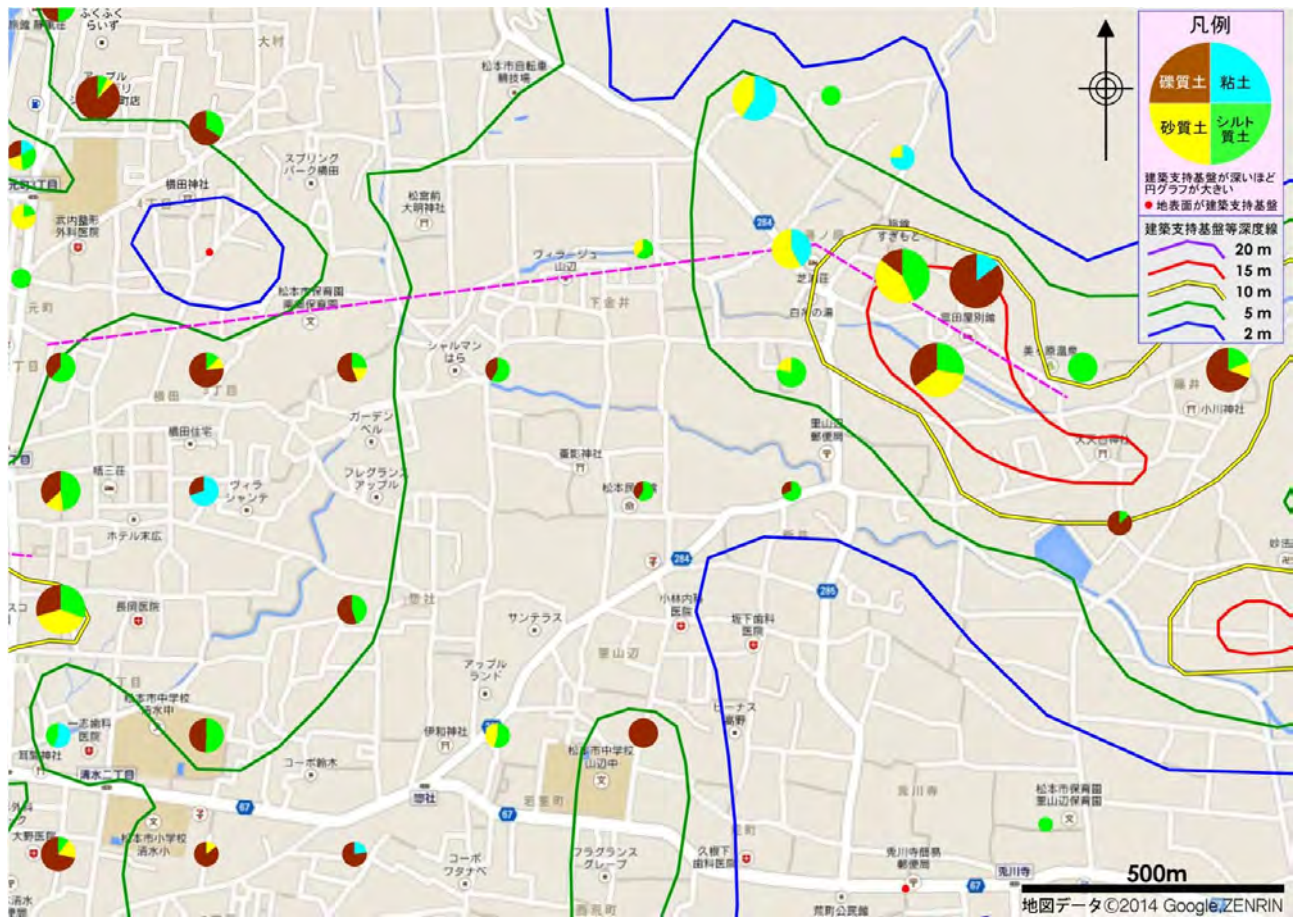
図3-3-A 揺れやすさマップと各地の地盤1 [岡田—浅間温泉] 断面

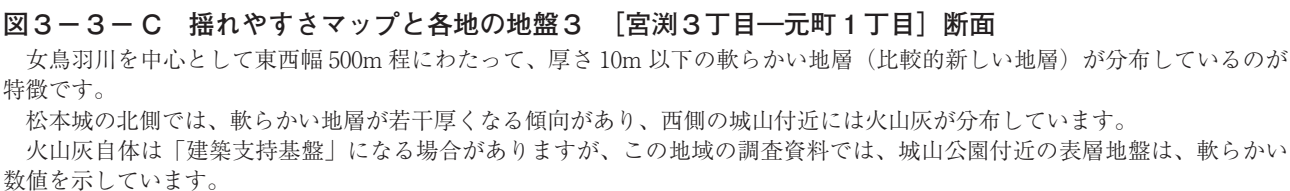
断面図のほぼ中央に女鳥羽川が北から南に向かって流れ、女鳥羽川の西側部分には礫質土がみられます。これは、大きな流域をもつ女鳥羽川が、上流から多くの礫を運び、これが長い年月をかけて堆積したものです。締まり具合は良好で、ほとんど地表付近に「建築支持基盤」が存在しています。

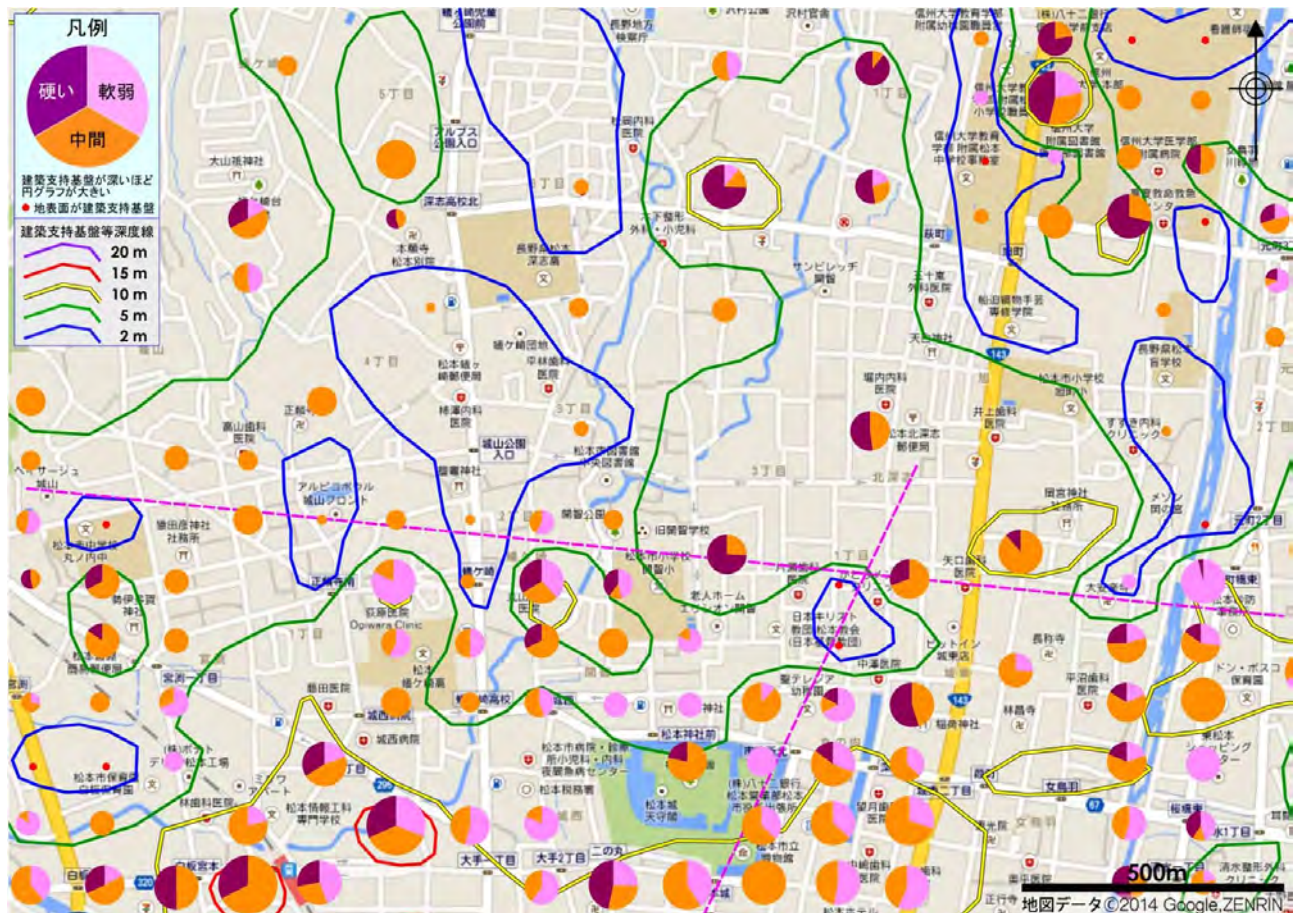
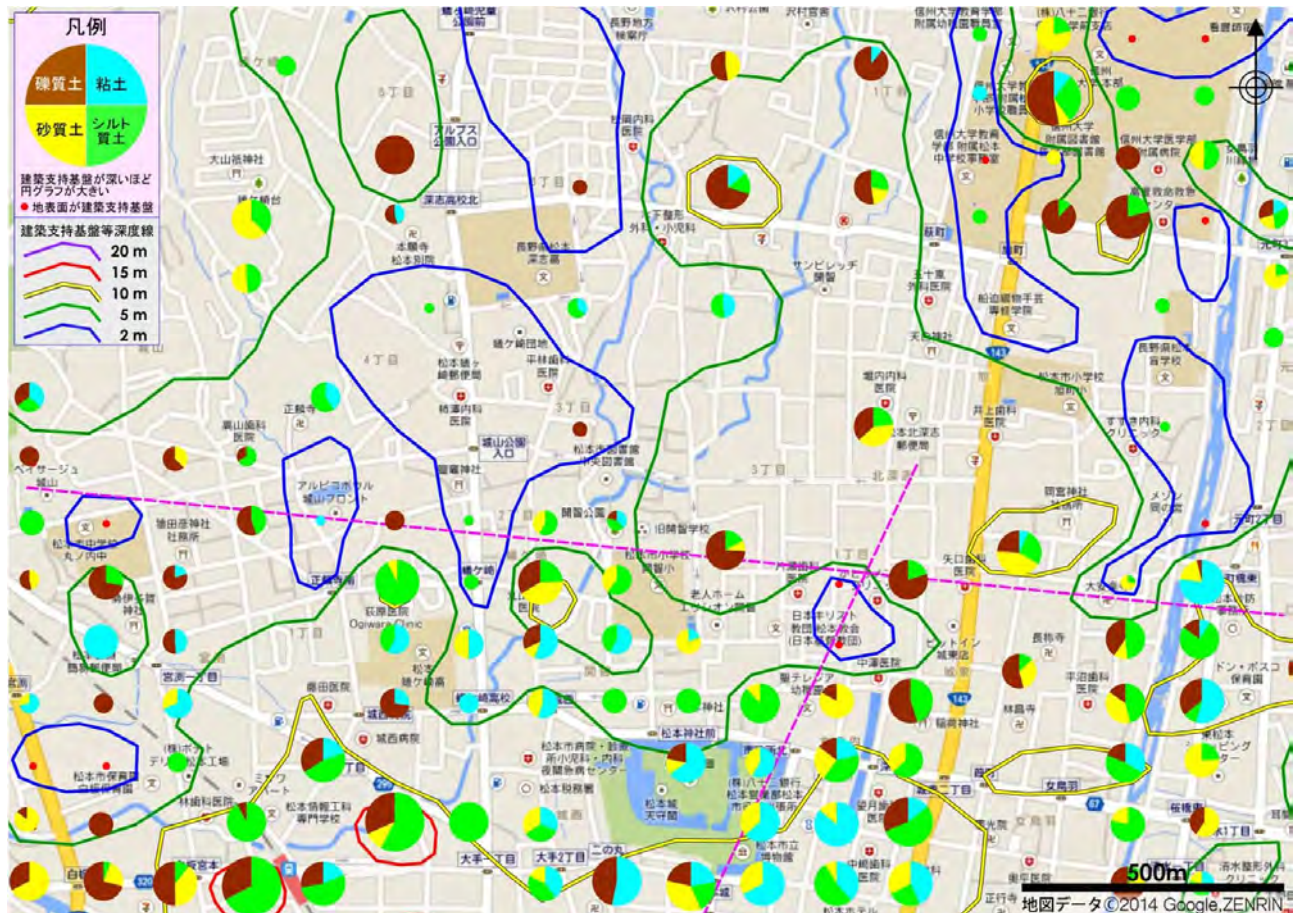
現在の女鳥羽川は、自身がつくった堆積物を浸食し、河床を下げ(西側にやや明瞭な段丘を形成しながら)流れています。一方、浅間温泉付近には、シルトなどの軟らかい地層が堆積しています。ここは女鳥羽川が上流から多くの礫を運んで堆積するような場所ではなく、川と背後の山に挟まれて、多くの湧水やそれによる小さな湖沼や沼地が存在していたところなのではないでしょうか。











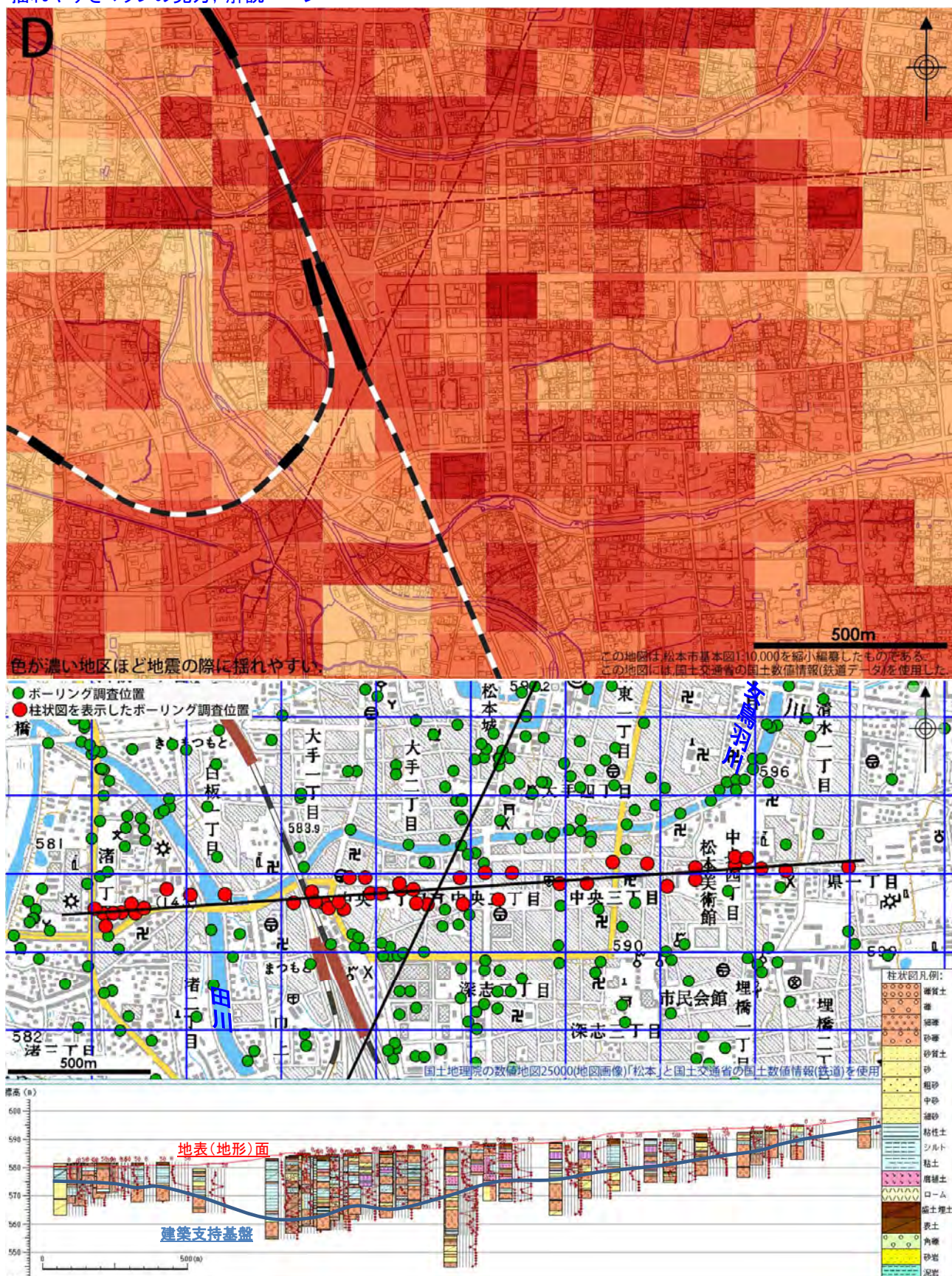
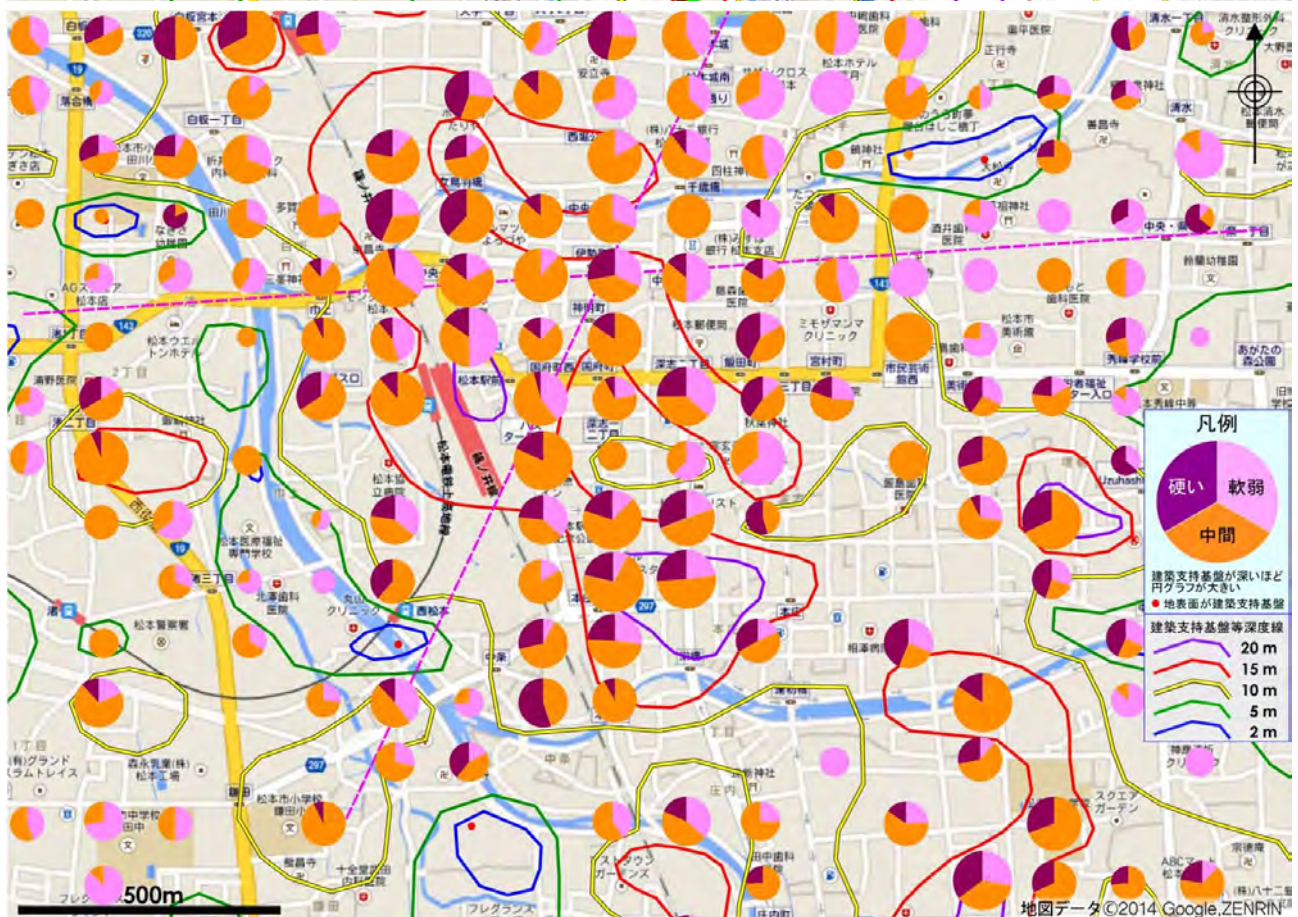
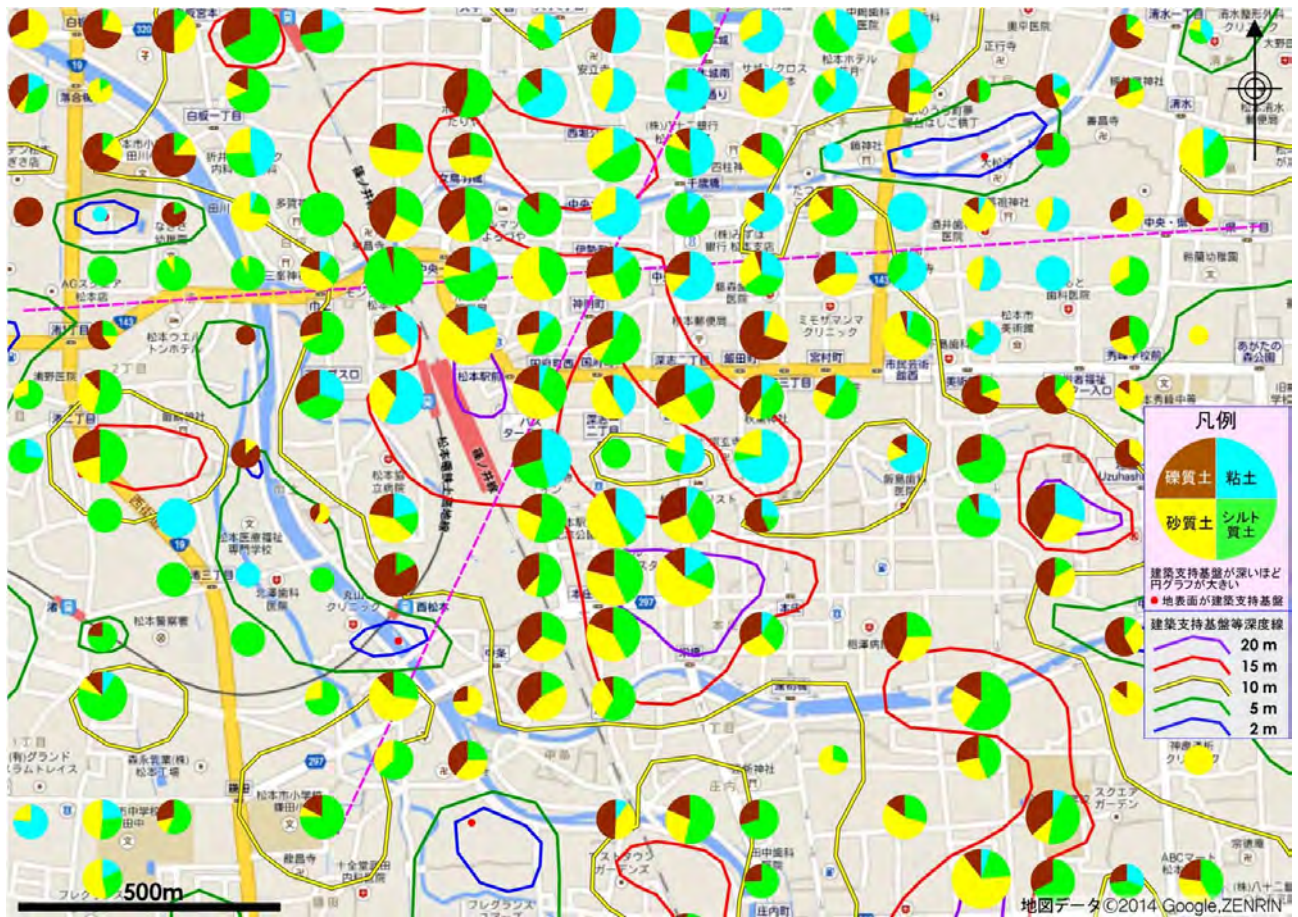
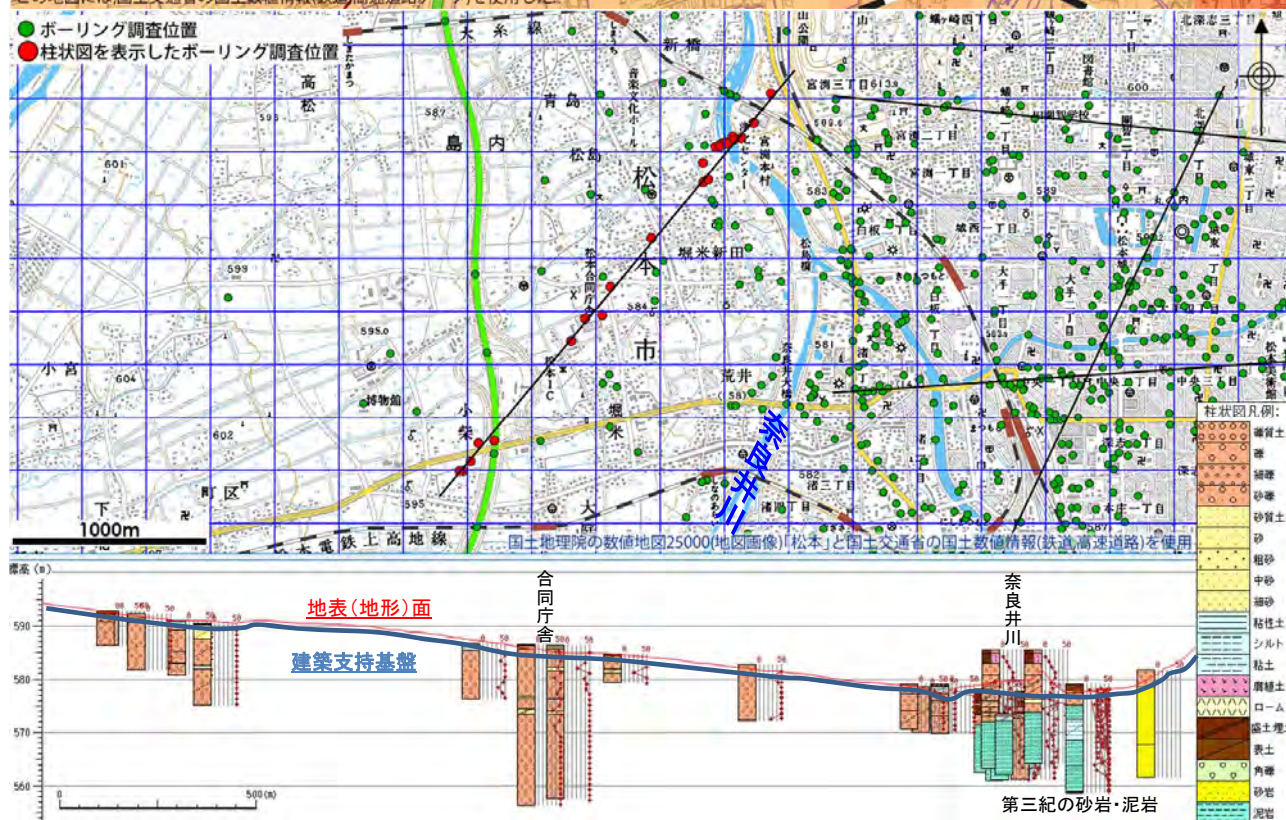


図3-3-D 揺れやすさマップと各地の地盤4 [渚1丁目—中央—県1丁目] 断面

松本市内では軟らかい地層(新しい)が最も厚く分布する地域です。断面図の薄いブルーで塗られた地層が、泥を主体とした細粒な堆積物です。なぜ、そのような地層ができるかですが、北から女鳥羽川、東から薄川、南から田川が流れ込んで合流する付近であること、西側からは大きな流域を有する梓川がたくさんの土砂を運んできており、流れ出る出口をふさぐような効果をもたらしていたと考えられます。

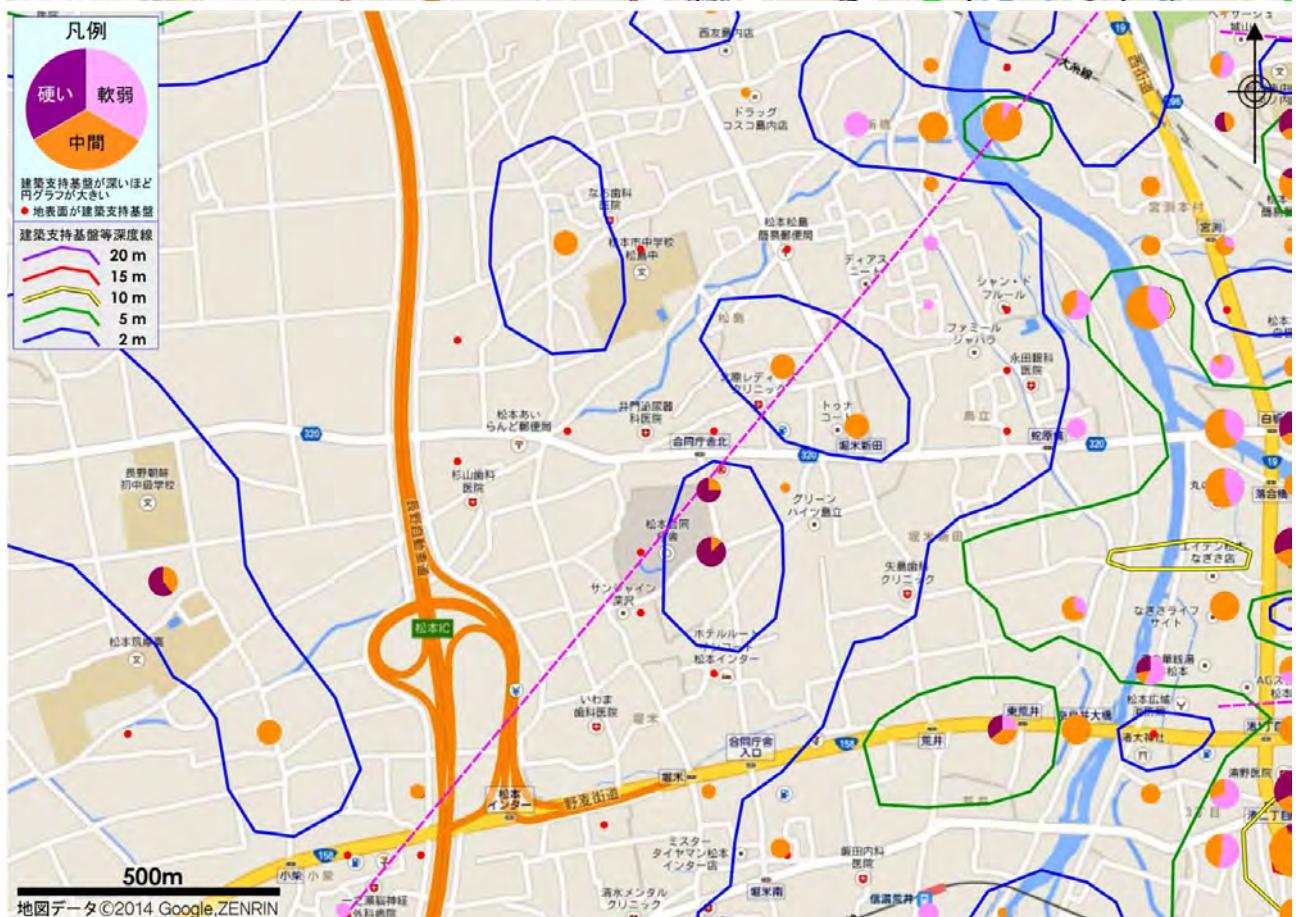
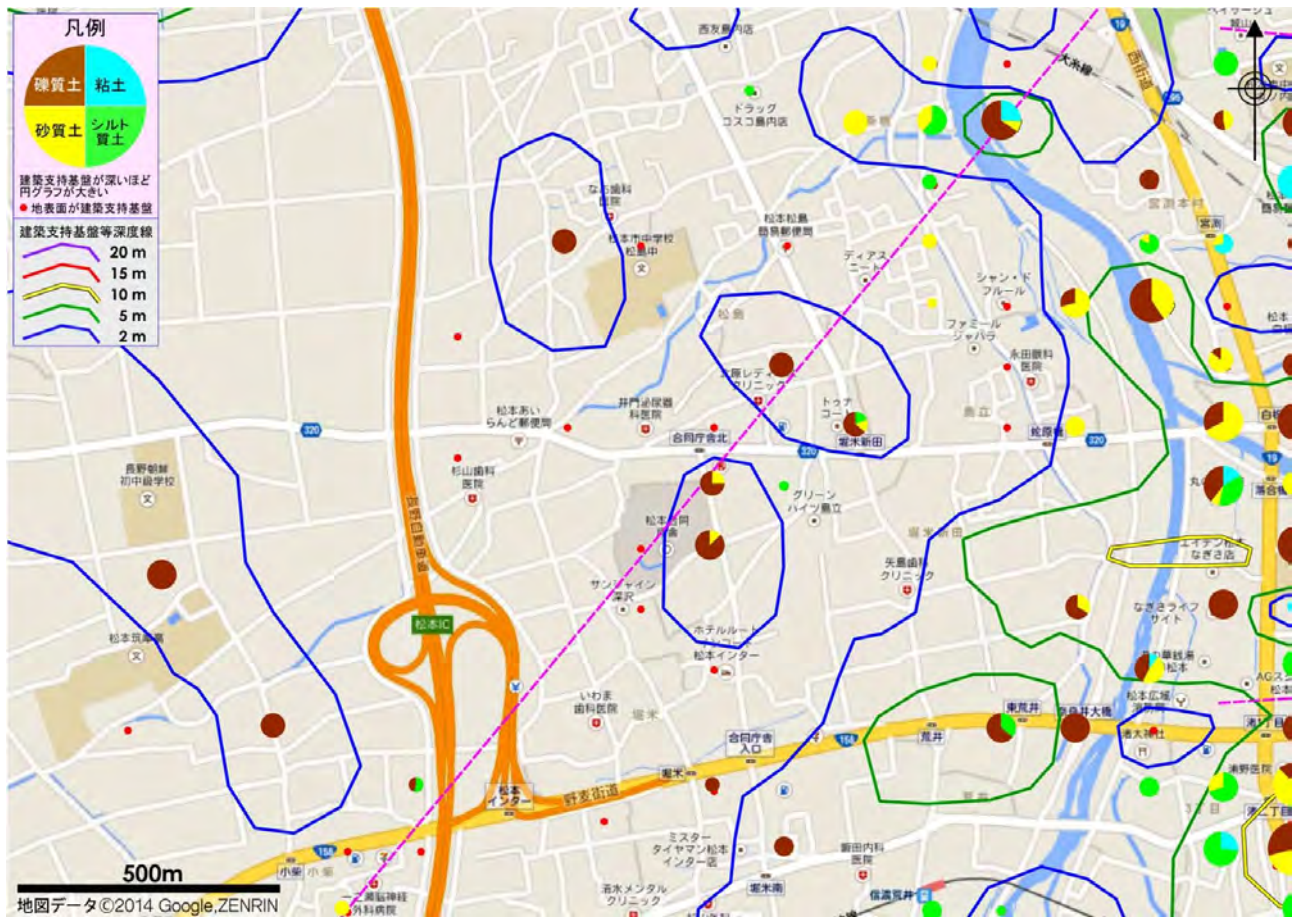
松本地域に人々が定住しはじめるごく直前まで、松本城の周辺は、小さな湖沼、または湿地となっていた可能性が考えられ、北松本駅の工事で地下を掘った際には、厚くて軟らかい泥の堆積物が観察されました。





この断面では、「建築支持基盤」が比較的均一に浅く分布しており、やや強い地盤と言えます。しかし、奈良井川付近の深部のボーリングで調べた地層が重要です。アルプス公園を形成している新第三紀という古い時代の岩石（基盤岩）が⁸、平野部の地下深いところに存在することが確認されています。

— 28 —



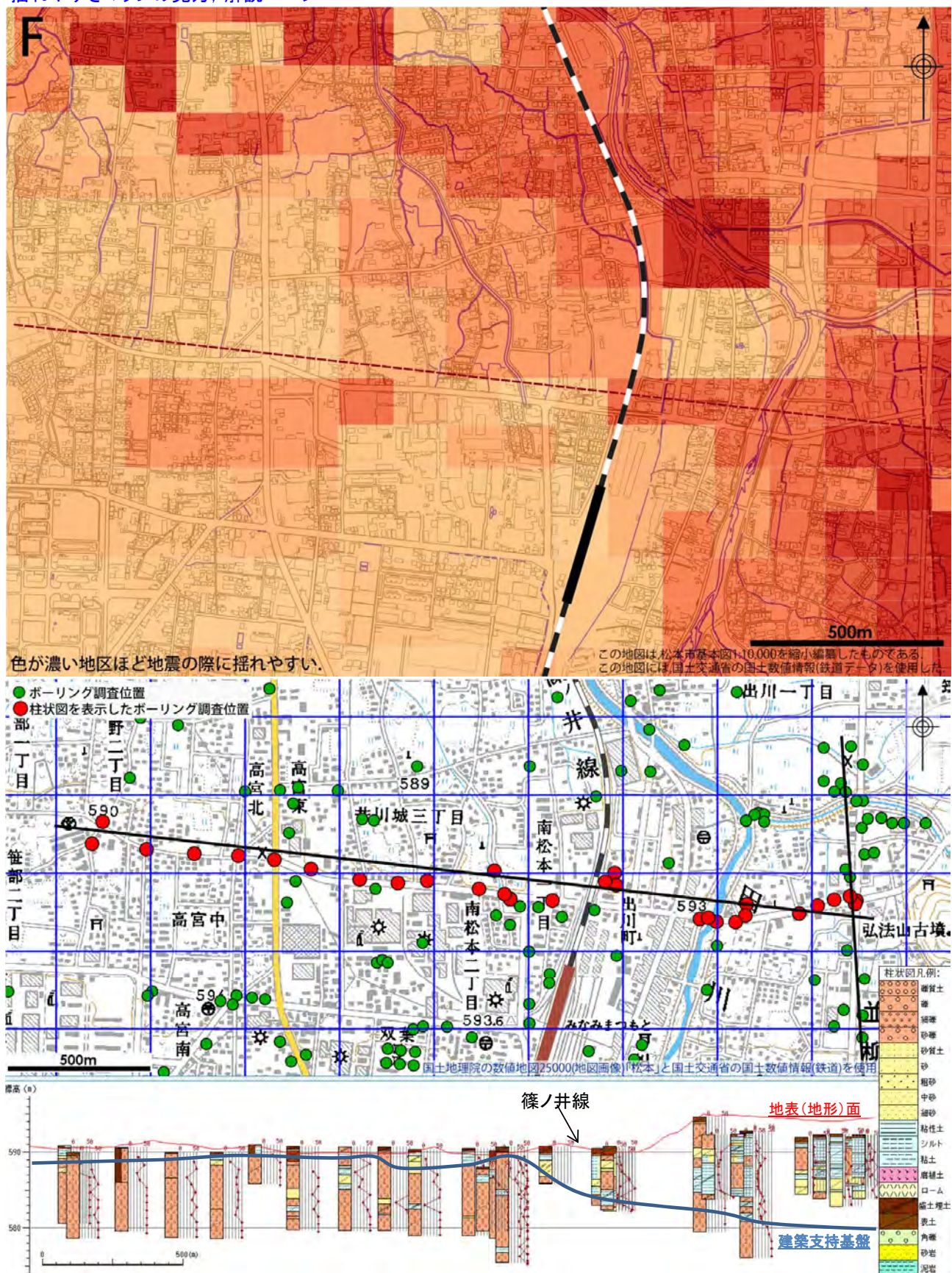


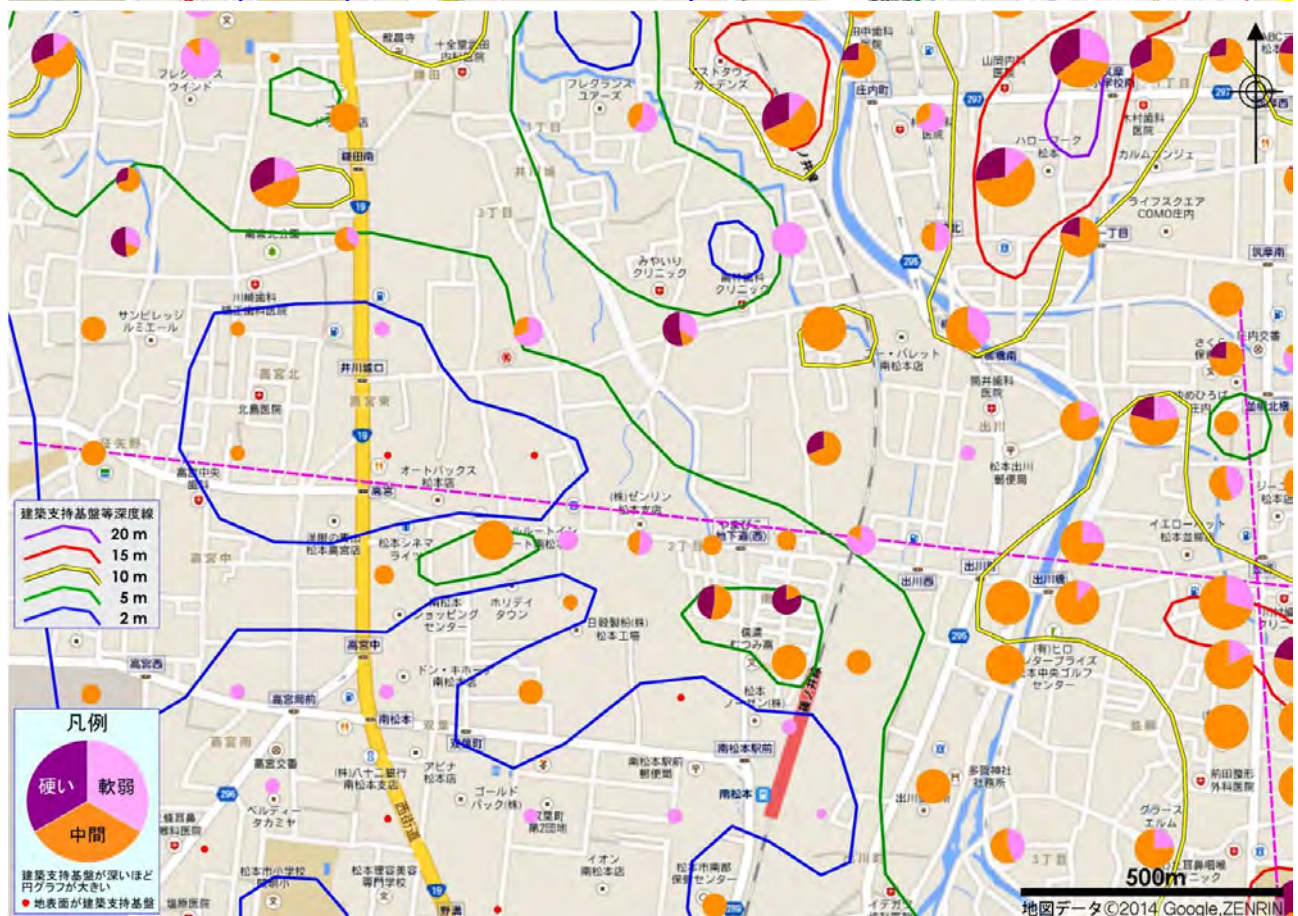
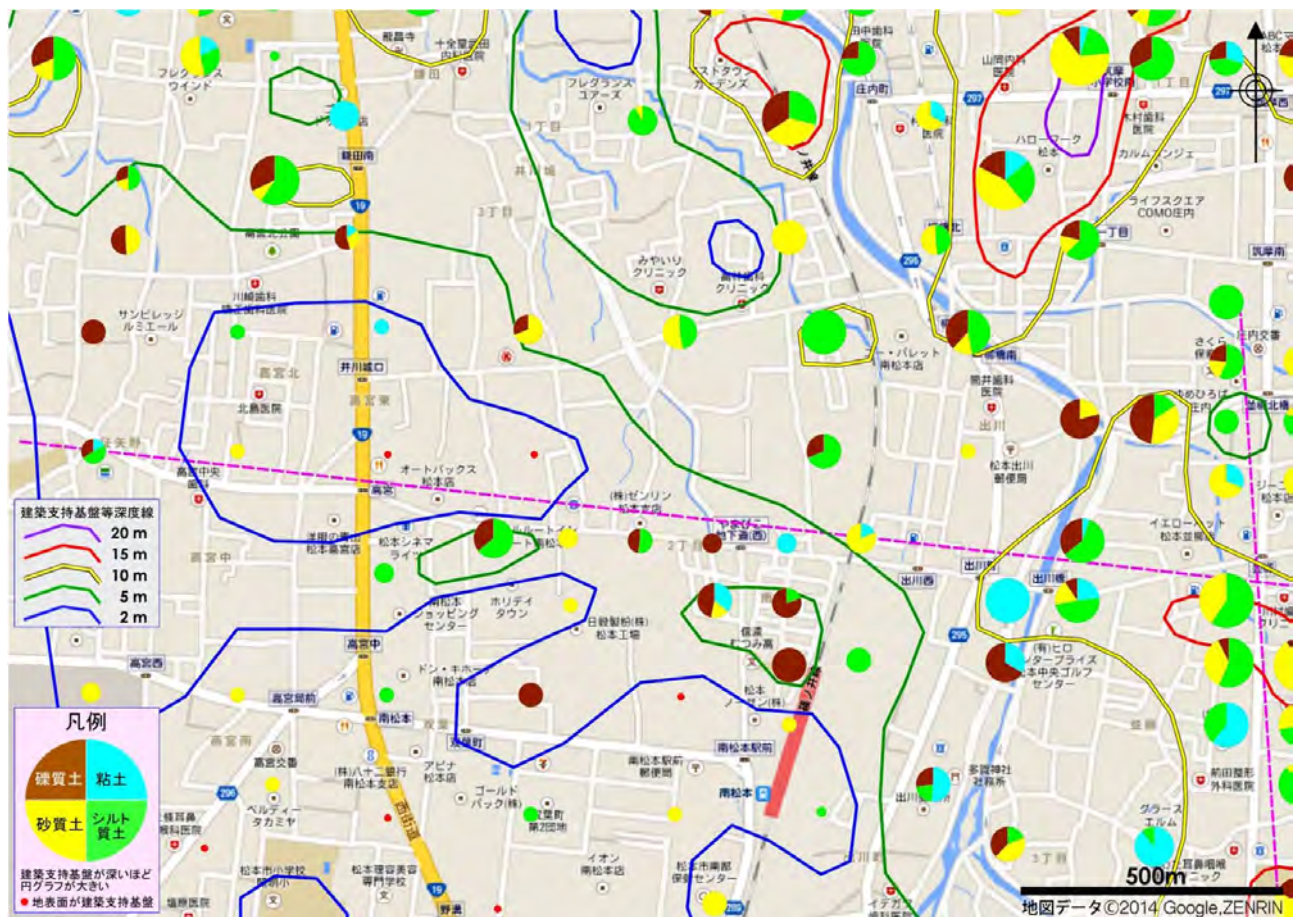
図3-3-F 揺れやすさマップと各地の地盤6 [笹部2丁目-南松本-並柳] 断面

篠ノ井線よりも東側で軟弱地盤が非常に厚く分布していることが特徴です。

南松本の東側には弘法山古墳がある山塊が北北西-南南東方向に存在します。これは牛伏寺断層が存在している影響があるとも言われています。

この山塊と南側から流れ下った牛伏川と田川との間が、松本駅付近と同様な湖沼・湿地をつくっていたと考えられます。

このため、泥を主体とした地層が厚く堆積し、この傾向は、牛伏川沿いにさらに南側まで続いていることが、図3-3-Iでわかります。



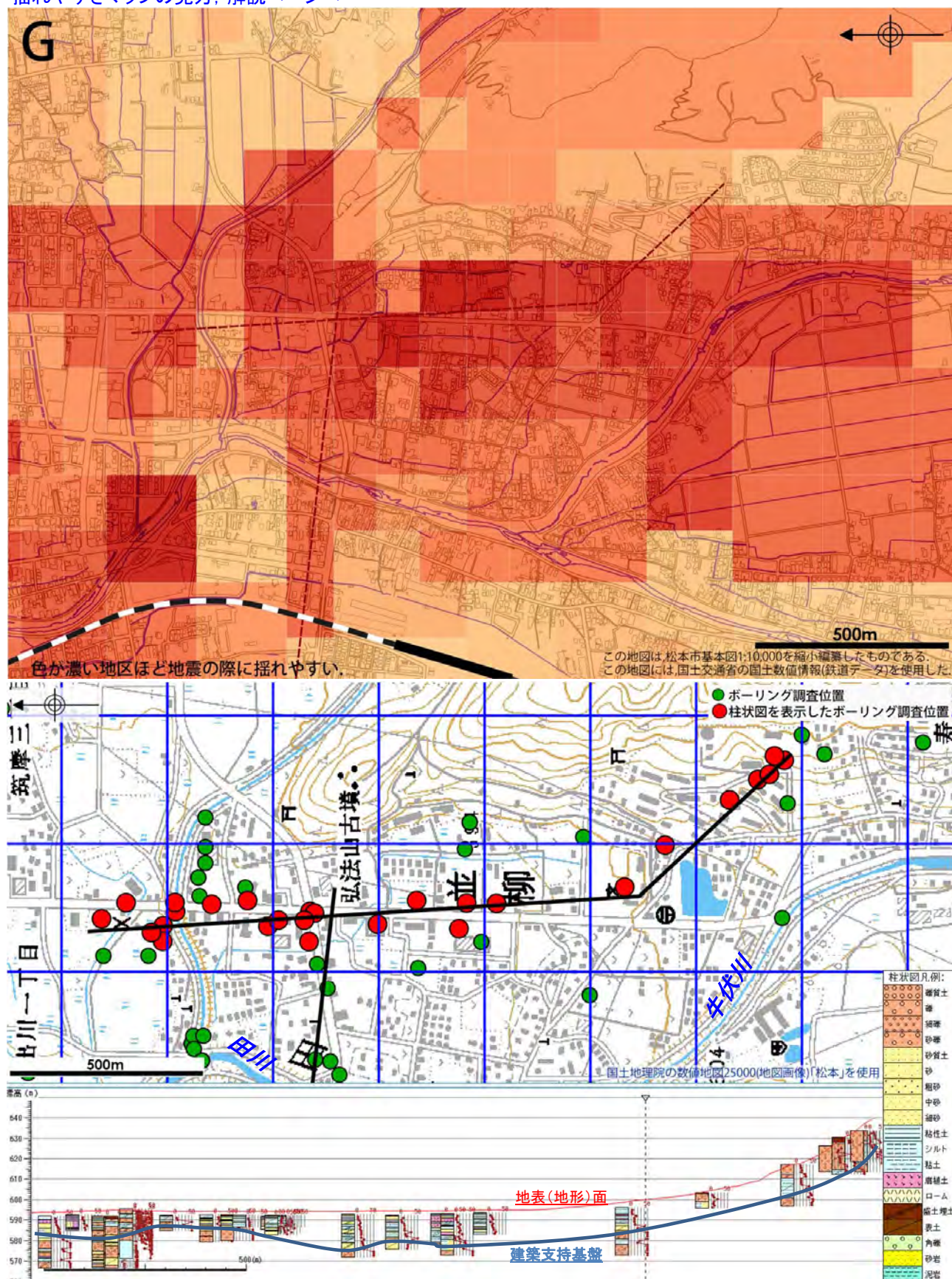
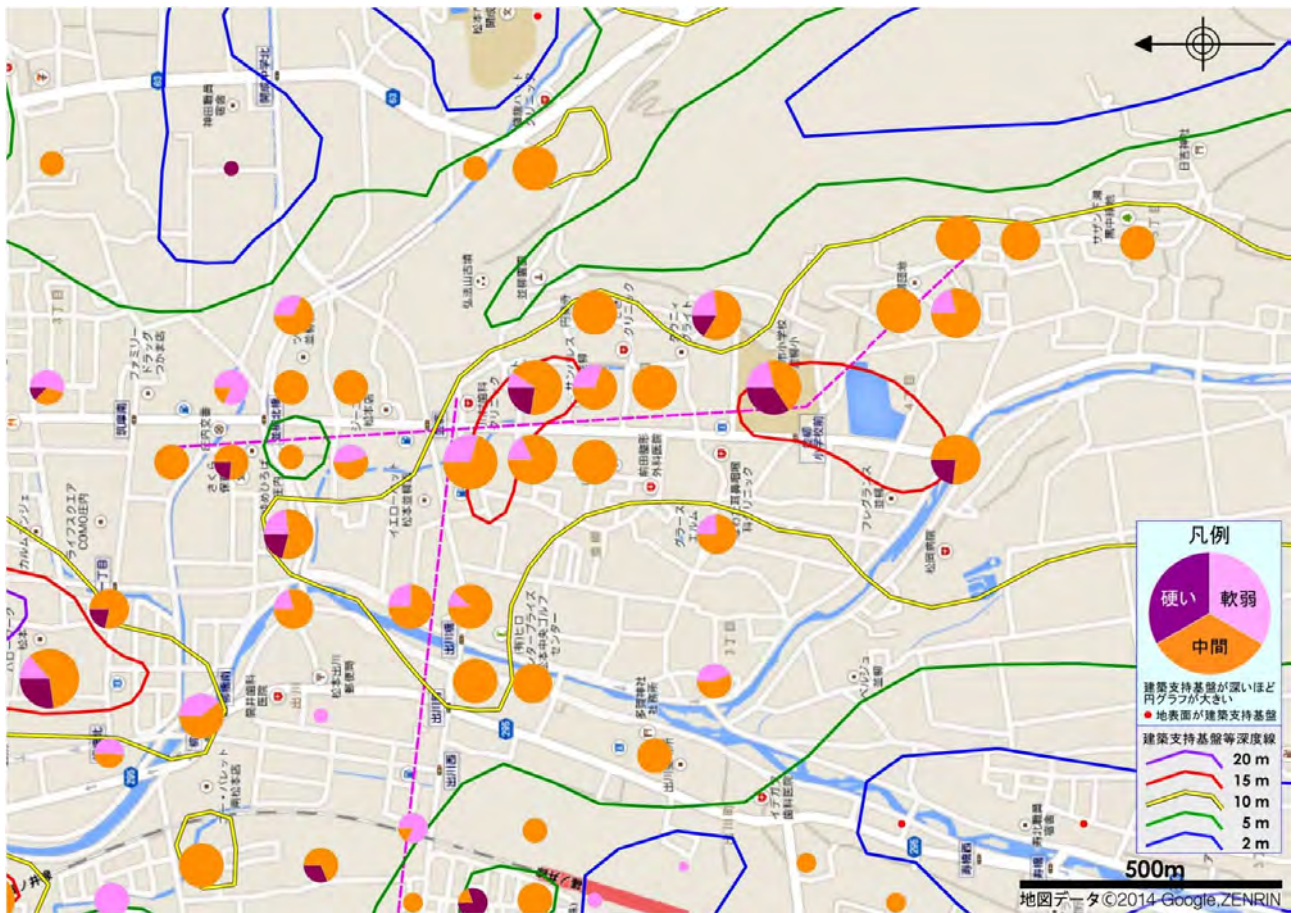
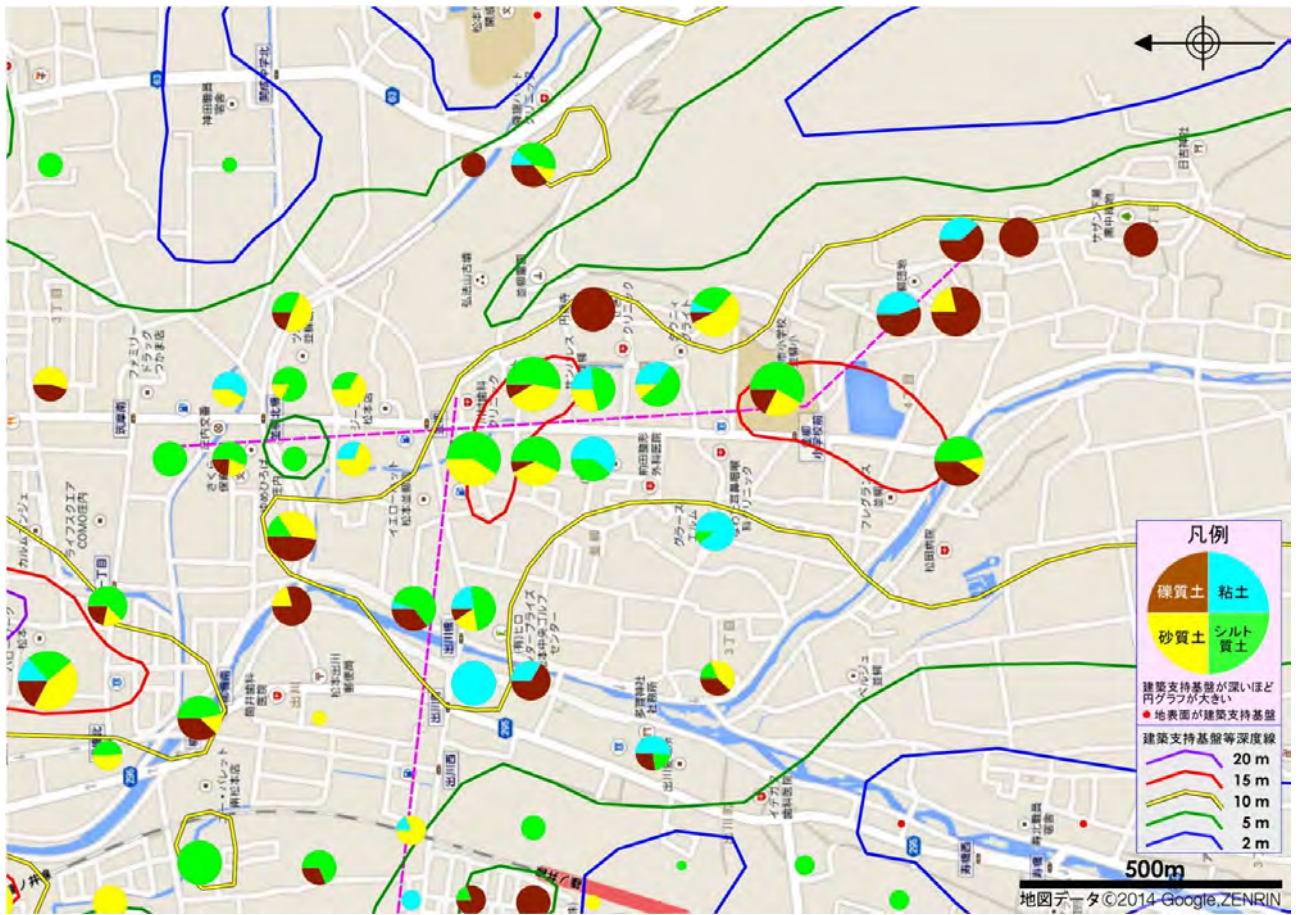


図3-3-G 揺れやすさマップと各地の地盤7 [並柳地区南北] 断面

並柳付近は、弘法山と田川、牛伏川に囲まれた低い土地だったとみられます。明治時代の図面には数個の池が書かれており、水田が多くみられます。

このような低地に泥などの細粒な堆積物が厚くたまっているため、「建築支持基盤」は深くなっていますが、北側にむかってやや浅くなっています。この原因ですが、付近工事の際に北北西に伸びている弘法山の山塊が平地にも続いていることがわかり、そのために支持基盤が浅くなっているとみられます。



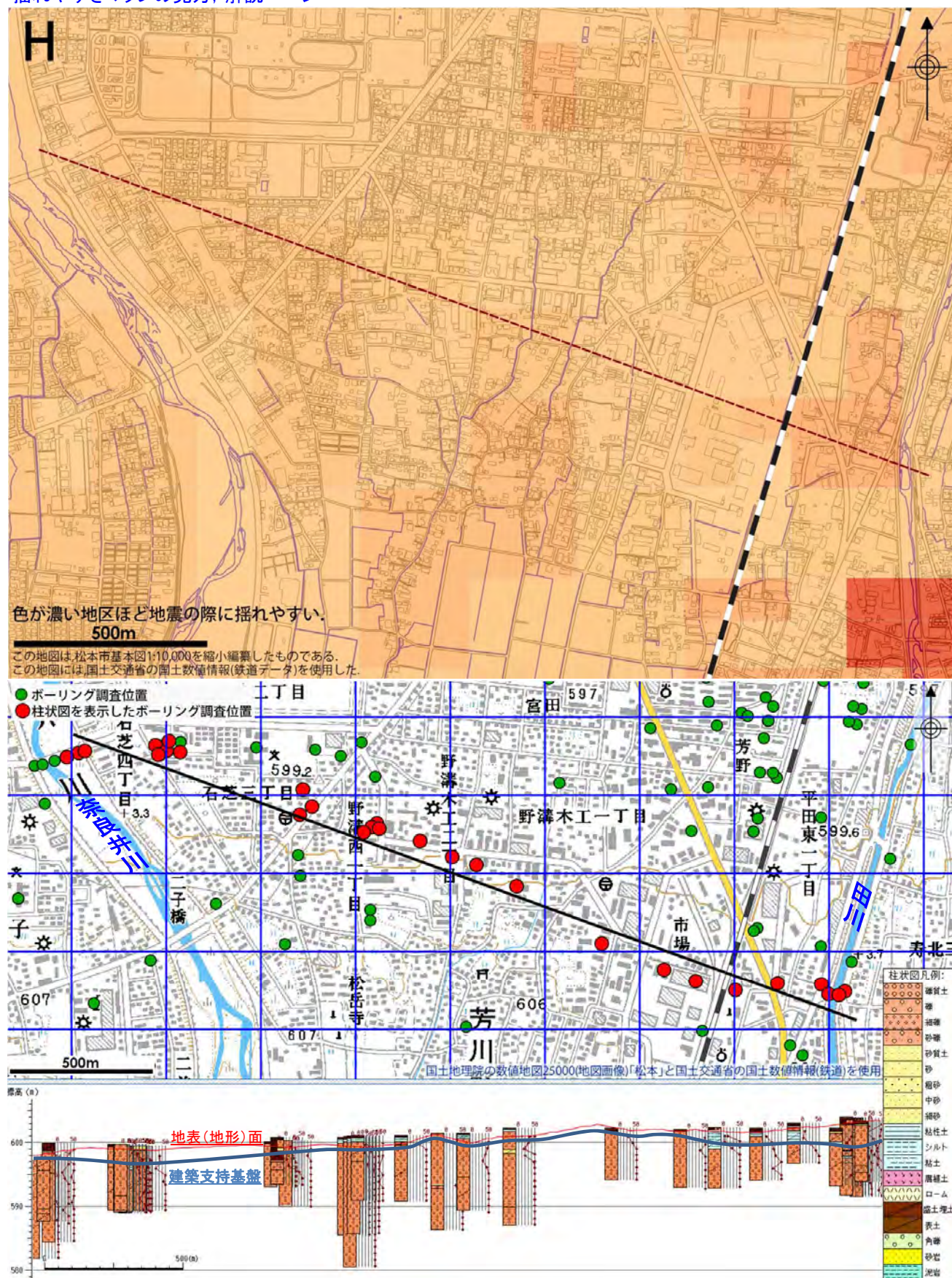
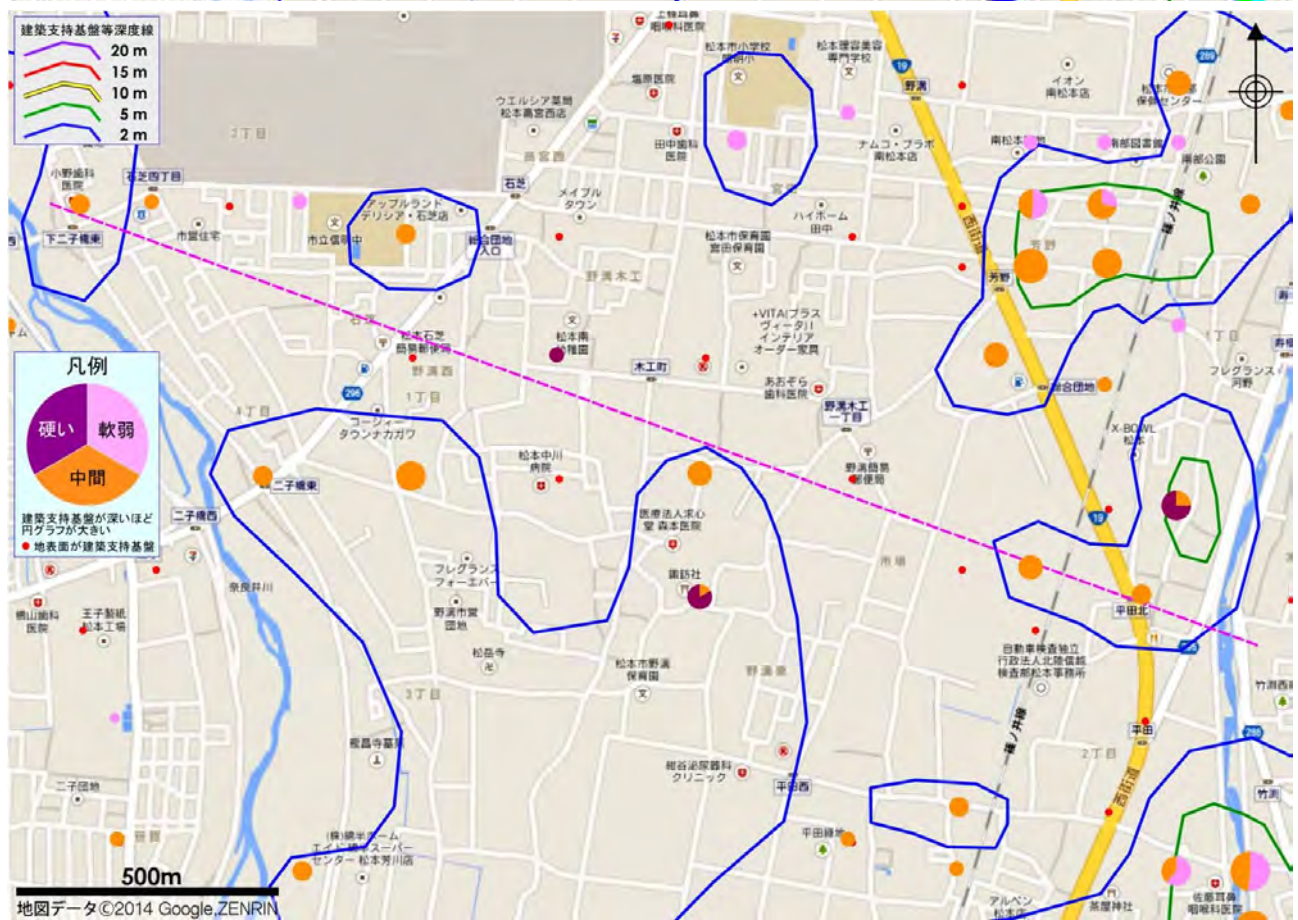
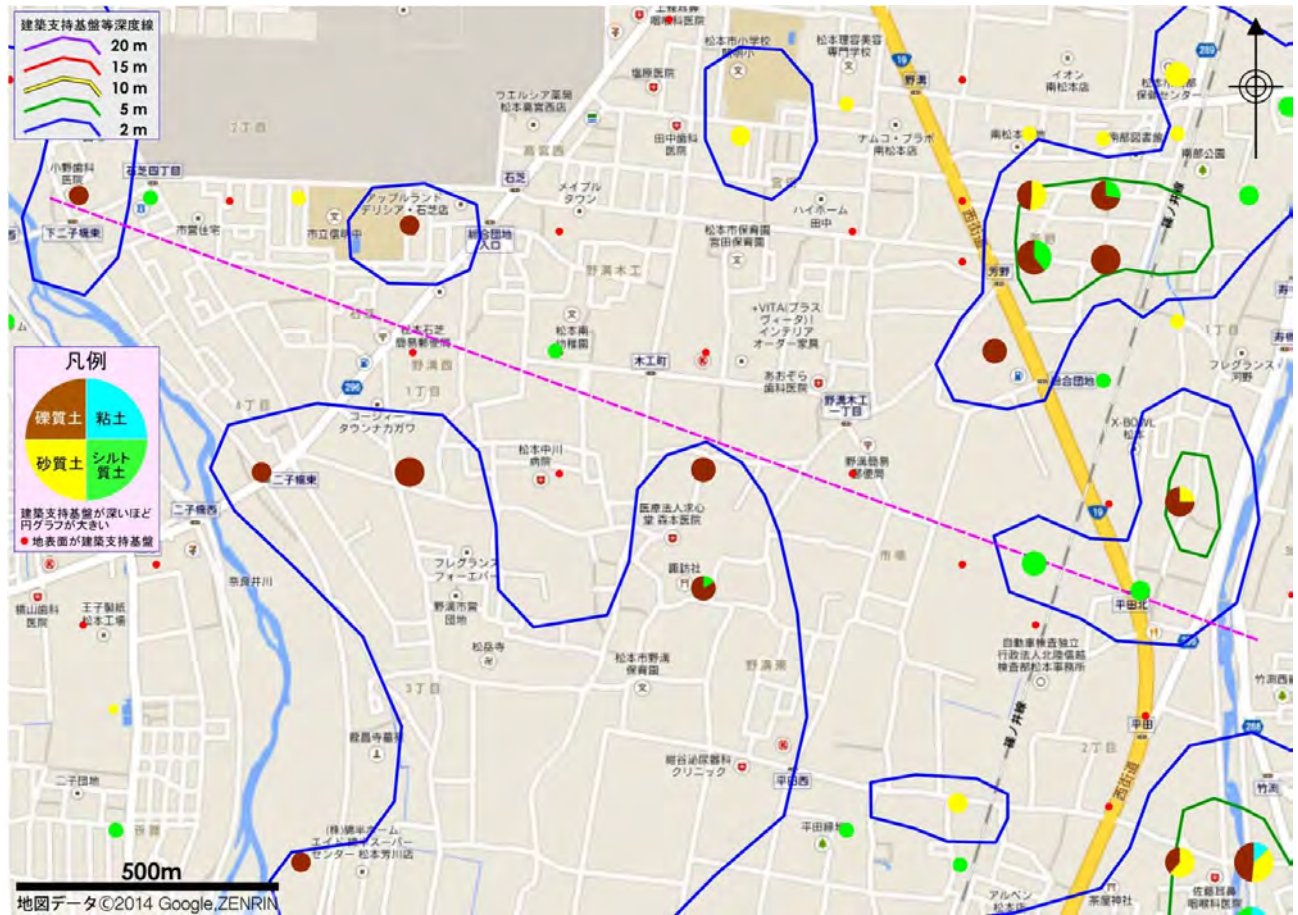


図3-3-H 揺れやすさマップと各地の地盤8 [石芝—野溝木工—市場] 断面

奈良井川と田川に近いところでは、浅い所に軟弱な地層が見られますが、川から離れた地域では比較的強い地盤が地表近くまで分布しています。



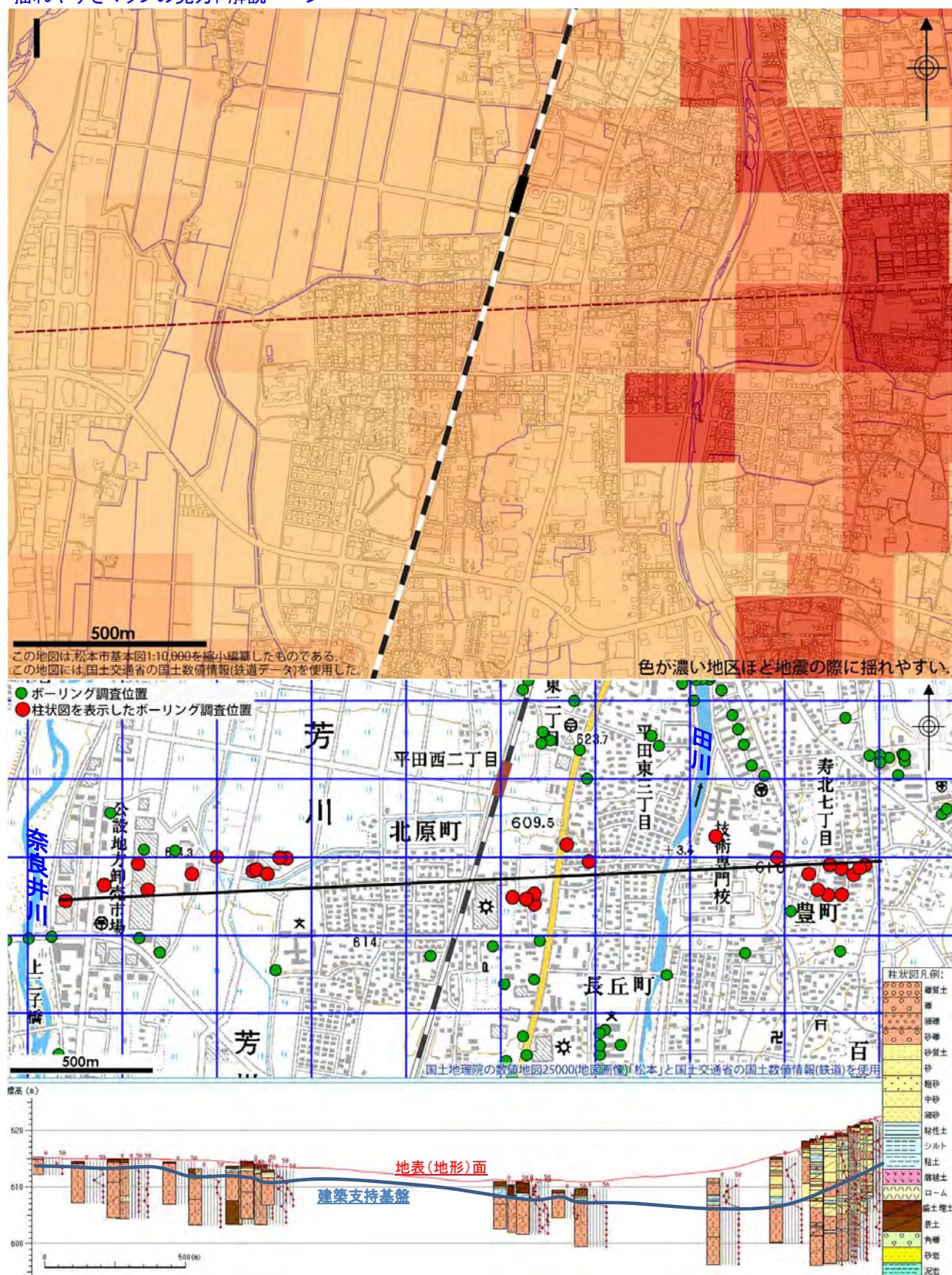
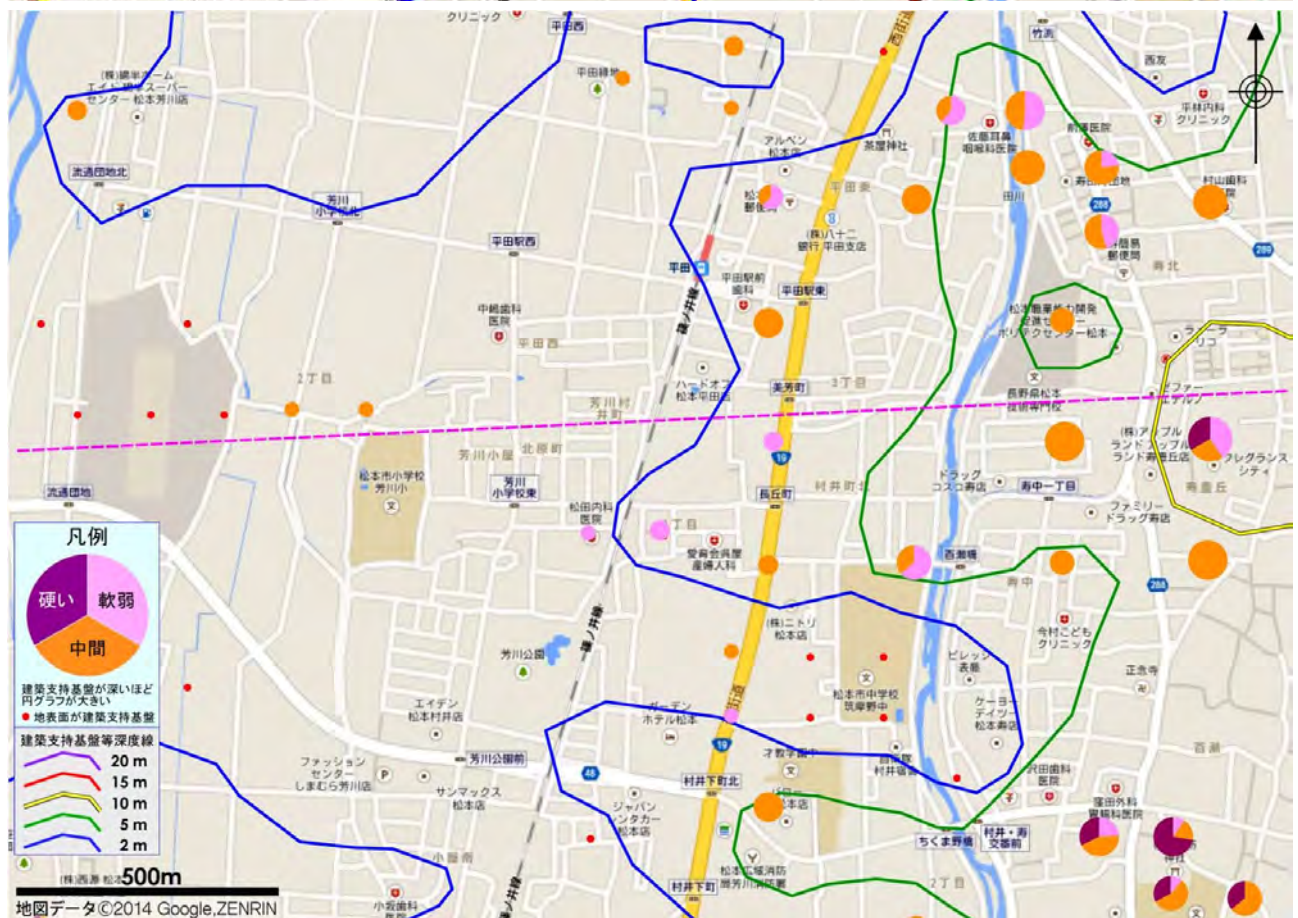
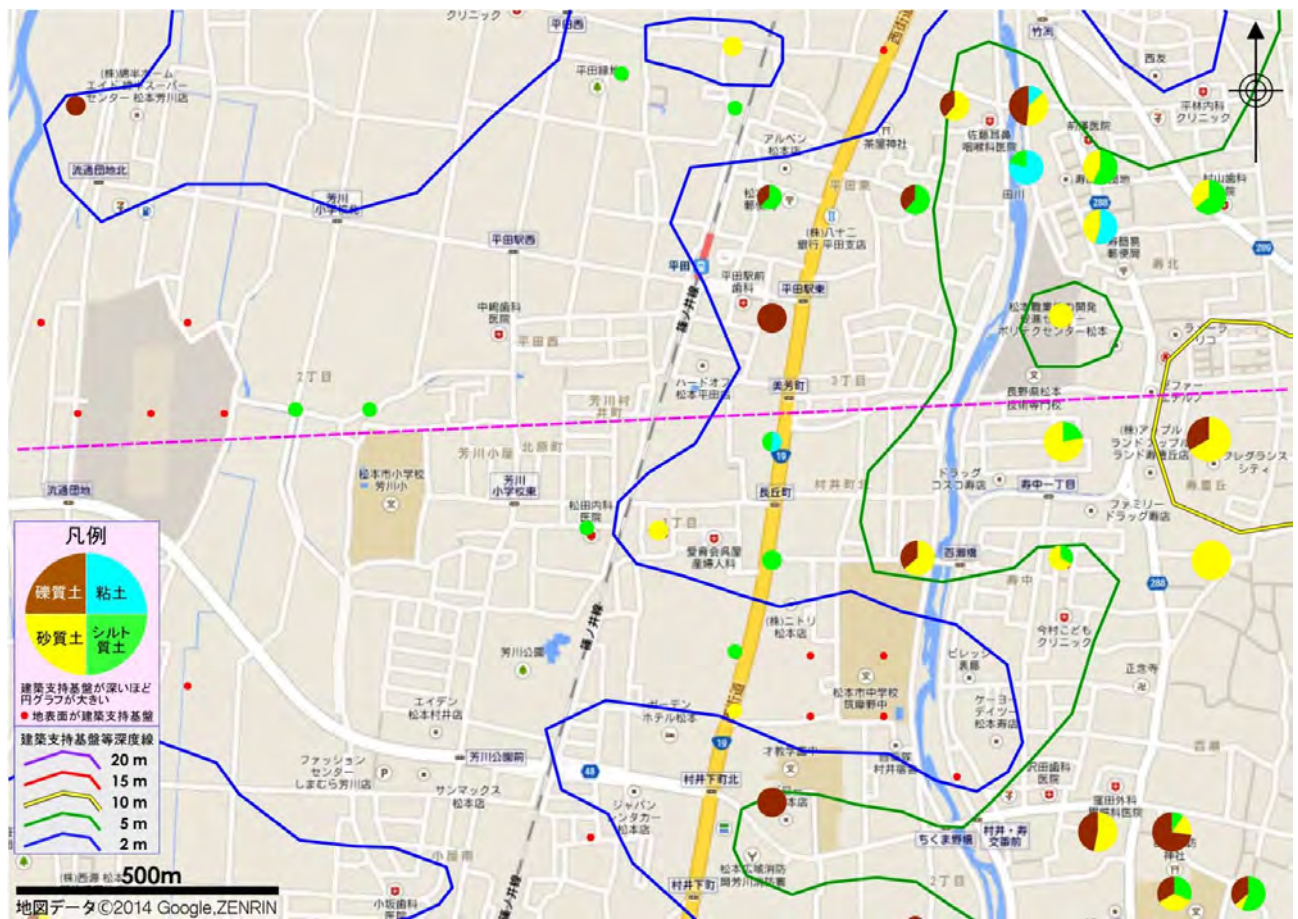


図3-3-1 揺れやすさマップと各地の地盤9 [公設市場—(平田駅)—寿北7丁目] 断面

この付近は、現在の田川周辺から東側に向かって、「建築支持基盤」が深くなることが分かります。

これは、牛伏川が運んできた堆積物の影響とみられます。図3-3-Fと比較してみると、同じ軟らかい地層でも泥よりも粒径が大きな砂が多いことが色分けで見取れます。これは堆積する場所に若干勾配が付くことで(運ぶ水の流れが少し速くなる)、砂分は堆積するが、泥はさらに下流に流されるためです。



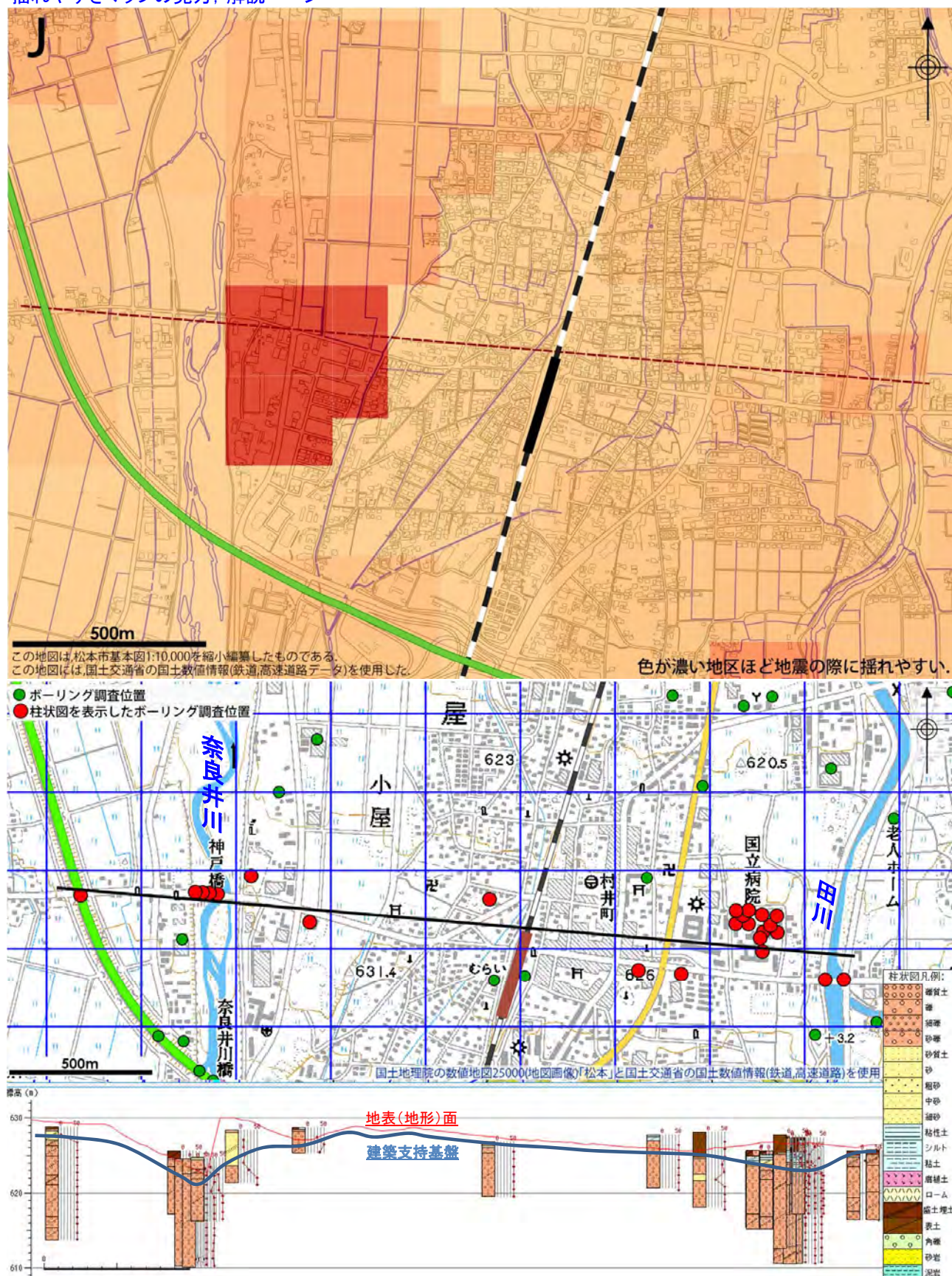


図3-3-J 揺れやすさマップと各地の地盤10 [神戸橋—村井駅—寿南1丁目] 断面

現在の奈良井川・田川の周辺にやや厚く軟弱な地層が厚く分布していることが分かります。

奈良井川や田川は現在のように堤防によって流路が固定されるまでに、氾濫のたびに川が流路を変えていたとみられ、現在の流路以外にも軟弱な地盤を形成しています。



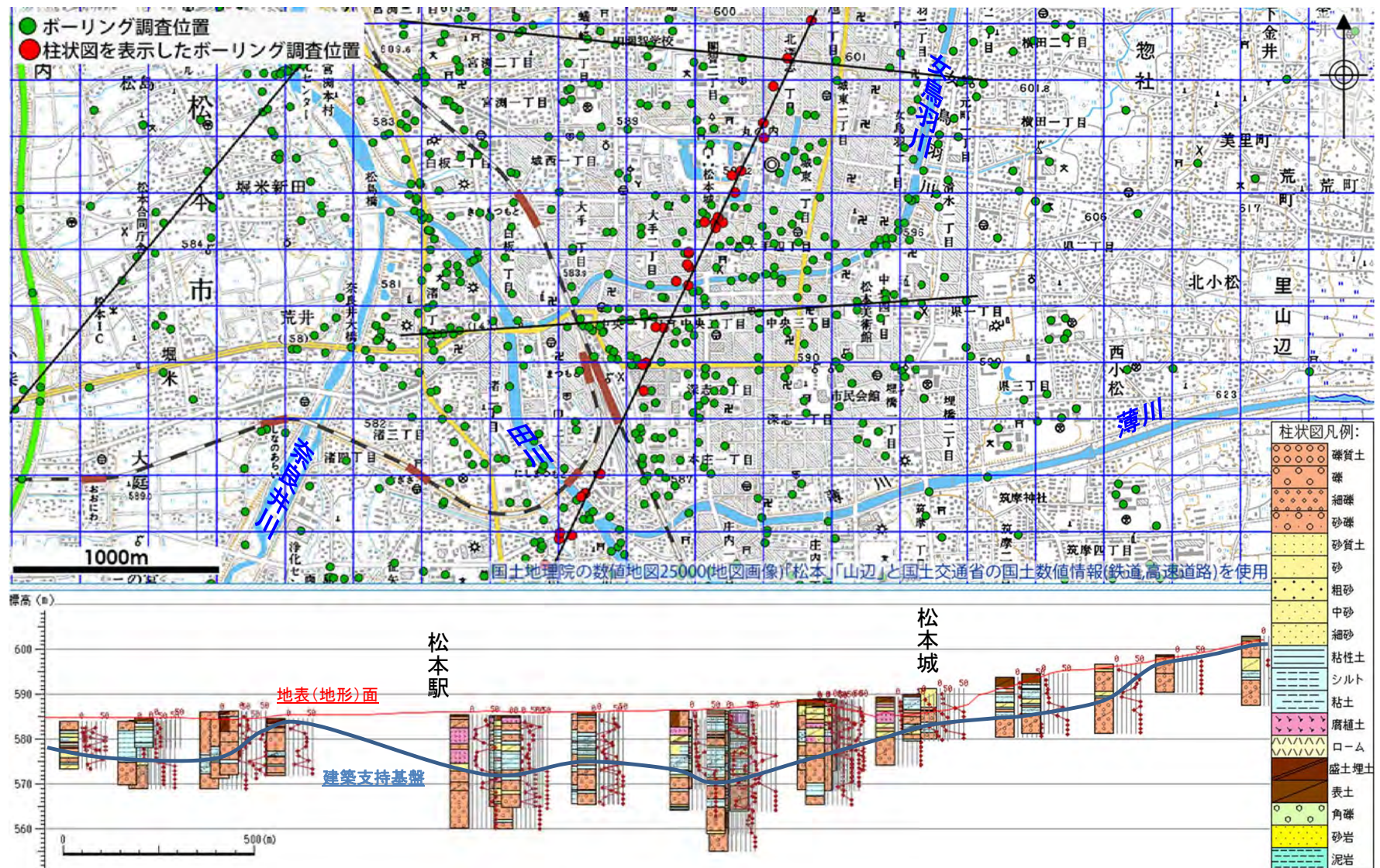


図3-3-k ボーリング柱状断面図(鎌田—中央—北深志)

この図は、図3-3-Dと一緒に見ていただきたい図です。松本城から松本駅周辺には、シルト層などの細粒な地層が厚く堆積しています。この付近には、かつて沼地や湖のようなものが広がっていた可能性が高いのですが、その下の基盤も窪地状に周辺より深くなっています。この窪地(低地)にむけて、古くから女鳥羽川や薄川・田川などから多量の砂礫が運搬され、厚く堆積してきたのでしょう。山地から流れ出す水は盆地に出ると表流水としてだけでなく、地下水としても流れます。松本城から松本駅周辺には、源智の井戸や女鳥羽の泉などの古くから利用されてきた湧水井戸がたくさんありますが、それらはいずれも地形や地層の変化する場所などで地表に湧き出しているものです。

3-4 揺れやすさマップと 630 松本地震の震度

今回作成した「揺れやすさマップ」は地震の際の揺れやすさを地域（マス目）ごとに色分けしたものでした。「揺れやすさマップ」の基となった地盤モデルができていますので、今後発生するであろう様々な地震の際の予測震度を求めることもできますが、ここでは地盤モデルの有効性を確認するために、630 松本地震のシミュレーション結果を見てみましょう。

図 3-4a は今回作成した地盤モデルを使って 630 松本地震と同じ震源で同規模の地震が発生したと仮定した場合の計測震度を計算で求めたものです。

図 3-4a の上の図は各マス目の地下の工学的基盤（建築支持基盤）面上での震度のちがいを色で表しています。震央付近は濃い赤（震度 5 強）で、震央から離れるに従い黄～緑色（震度 5 弱）へと同心円状に色が変化しています。

図 3-4a の下の図は地震波が工学的基盤（建築支持基盤）の上位にある軟弱な地層を含む地盤を通過し、地表へ達したところで計測される震度を示しています。震央付近ではもちろん震度は大きくなりますが（震度 5 強）、地下の工学的基盤面上での震度（図 3-4a の上の図）に比べると、非常に複雑な震度分布となり、震央から離れた数地域で震度 6 弱が出現します。

図 3-4b は図 3-4a の下図を柱状グラフとして示したものです。柱の色は図 3-4a 下図と同じですが、震度が大きいマス目ほど高い柱として表現して、周囲より（計算された）計測震度が大きい地域を際立たせています。震央から離れた松本駅周辺や、南松本駅の東側（並柳地域）などでまわりの地域より震度が高いことがよくわかります。

図 3-4c は、図 3-4b と全く同じ範囲のアンケート調査によって求められた震度（アンケート震度）の分布図です。震度階級ごとに柱の色と高さを変えた柱状グラフとして表現しました。柱がないところは、田畑など人が住んでいないところ、あるいはアンケートが十分回収できず計算ができなかった地域です。図 3-4b、c の上下の図を比較してみると、アンケート震度が周辺より高い地域は、図 3-4a（下の図）や図 3-4b に示されているように、地盤モデルによって計算された地表の計測震度が高い地域とおおよそ一致することがわかりました。もちろんすべてが正確に一致するわけではありませんが、このような傾向が見られるということは、630 松本地震の際の複雑な震度の分布を生んだ大きな要因に、“地盤の違い”があることは間違いありません。このことから計算に使用した地盤モデルが十分信頼できる妥当性の高いものだと判断できます。

したがって、このモデルから作成した「揺れやすさマップ」はこれから起こるであろう地震災害の減災対策をはかる上で大いに役立つものと期待できます。

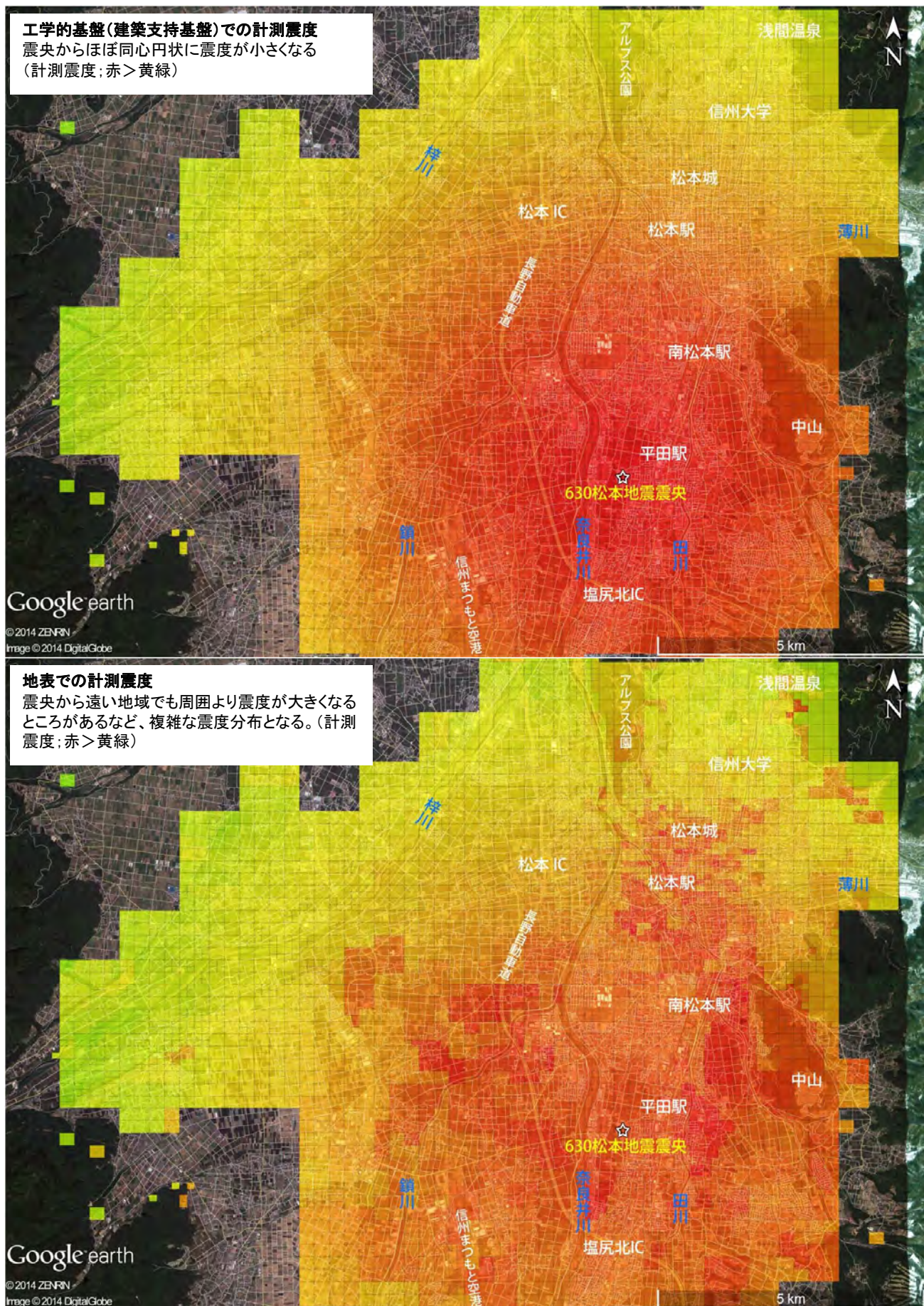


図3-4a 新しい地盤モデルでの630松本地震シミュレーション震度

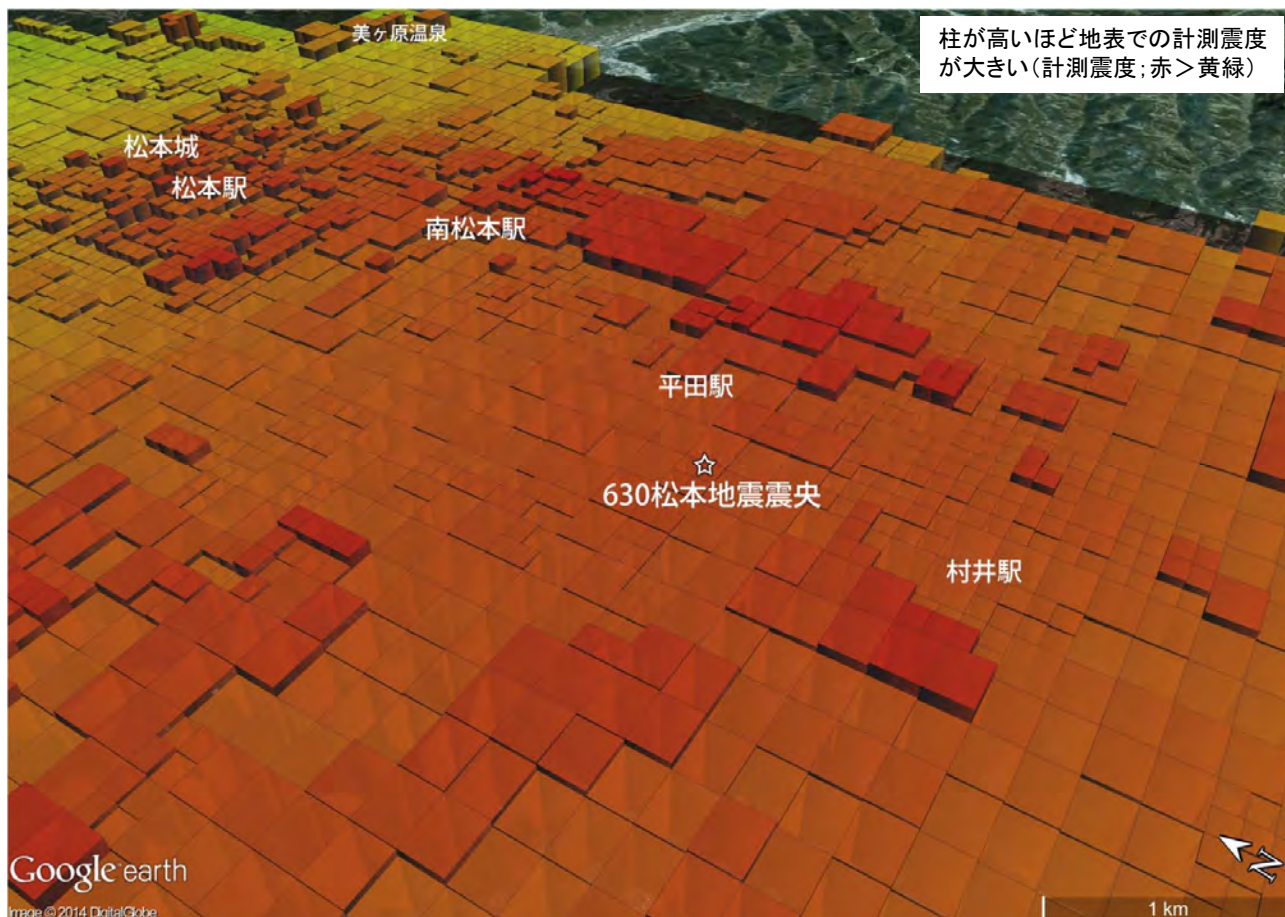


図 3-4b 630 松本地震シミュレーションによる計測震度

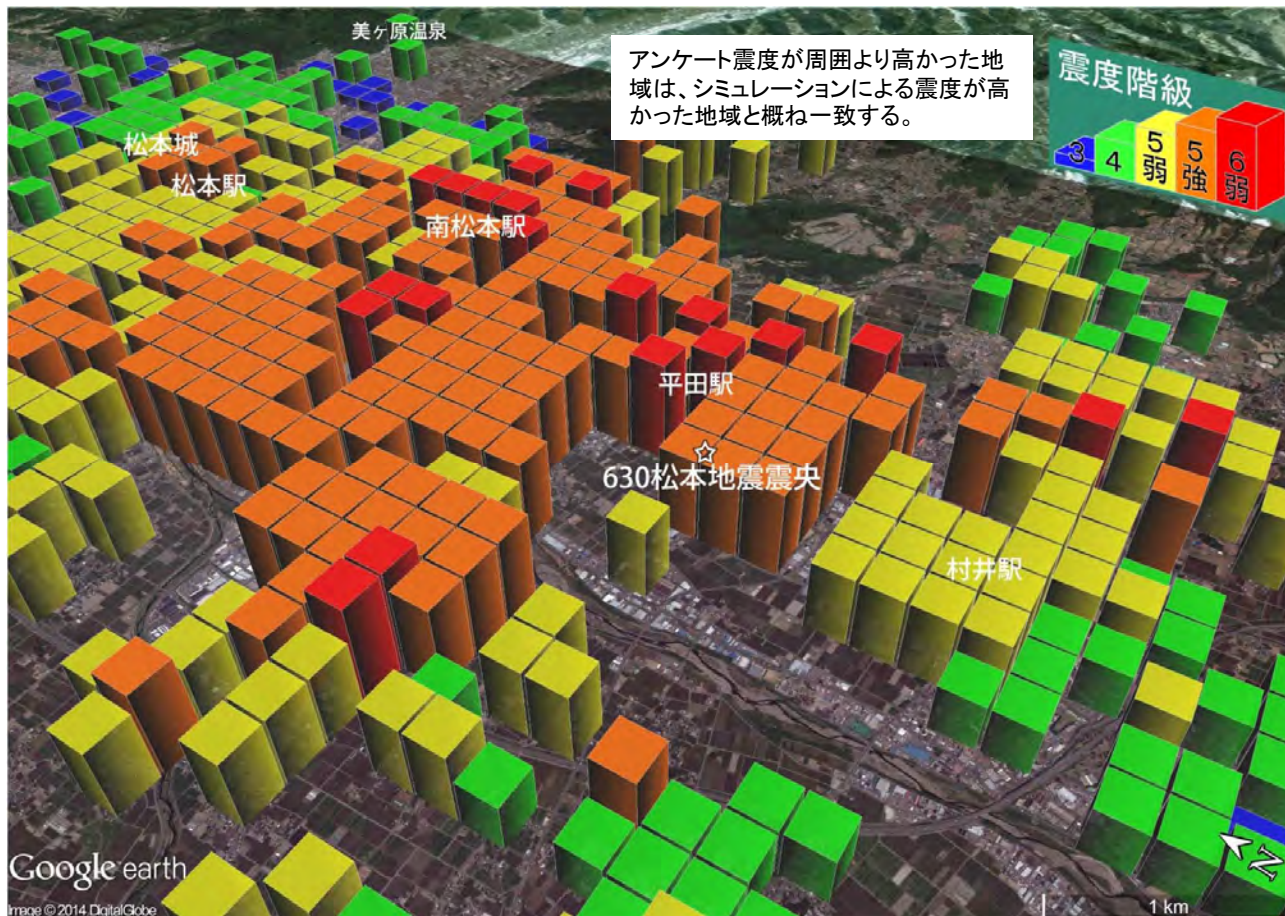


図 3-4c 630 松本地震のアンケート震度

3-5 微動アレー探査による松本市の地下構造の特徴

3-5-1 微動アレー探査の目的と探査地点の選定

微動アレー探査の目的

ここでは微動アレー探査という地下探査の観測で得られた、松本盆地の地下構造について解説を行います。微動アレー探査の手法や原理についての説明はここでは割愛いたします。興味のある方は、用語解説（5章）の該当部分をお読み下さい。

微動アレー探査でわかるのは地下数 km までの地震波の S 波速度構造です。S 波の速度は地盤・岩盤の強度を反映しており、いわゆる軟弱な地盤ほど速度が小さくなり、硬い十分な支持力を持つ地盤ほど速度が大きくなります。地下の地盤・岩盤の S 波速度構造がわかると、地震の発生時に震源断層で生じた震動がどのように減衰・増幅されて地表の揺れとなるかが正確にシミュレーションできるようになります。言い換えると、地下の S 波速度構造が判明していれば、強度（マグニチュード）や震源からの距離の異なる様々な地震波をプログラムに入力することで、地表の震度や地震波パターンを求めることができます。これは建造物にどのような地震の揺れが加わるのか、仮想実験できることを意味しております。

630 松本地震が生じた結果、盆地深部に伏在する活断層が松本盆地の地下にあることが明らかになりました。今までの断層の探査では、断層の動きによって生じた地表部のズレ(変位)に基づいて活断層かどうかを判断していました。今回の震源域では断層によるズレは発見されていませんでしたので、松本盆地のように河川の氾濫や土砂の堆積が頻繁に起こるような地域では断層のズレが消滅したり、埋積されたりして探査不能となってしまう可能性を示したのです。

微動探査地点の選定

信州大学では、上高地での旧河川の埋積地形の探査に威力を発揮した微動アレー探査法を適用すれば、震央地下での断層のズレが発見されるのではないかと考えて、平成 24 年度に探査を計画しました。幸いにも松本市の協力も得られ、最終的に 630 松本地震震央域を東西に横断する線上に位置する、寿北、平田西、野溝西、笹賀の 4 地点での探査を行うことができました。この結果、震央域でのズレは見出されたものの地下 2km にある基盤岩のズレは 100m 程度と比較的小さく、松本盆地の東縁に近い寿北と平田西の間に 1,300m を超える大きなズレ、即ち伏在断層が発見されたのです。

平成 25 年度は松本市と信州大学の全面的な協力を得て、盆地東縁の大規模な伏在断層の詳細な位置決定と活断層としての評価、北部市街地への断層の延長を追跡することを目標として探査を実施しました。松本盆地を東西に横断する 3 本の線（測線）上で、建造物のない空き地を探索し、学校の校庭や水田など 15 地点を探査地点としました。3 本の測線は、北から A 測線(島内地区)、B 測線（庄内地区～島立地区）、D 測線（寿地区～波田地区）と命名しています（図 3-5-3a を参照）。

微動探査結果に基づく S 波速度対比断面

各探査地点での S 波速度構造の解析結果に基づき、各測線での速度層対比断面図を作成しました。図 3-5-1a、b、c に A 測線、B 測線、D 測線の速度層対比断面図を示します。この断面図上では、ほぼ同じ S 波速度 (V_s) を示す地層を東西方向につないだ対比線が示されています。もし各探査地点の間に地層のズレ(変位)がなければ、この対比線は水平になるはずですが、この対比線の深度(高度)に探査地点間で差があると、速度構造にギャップが生じ、対比線は階段状の落差を示します。なお速度層対比断面図は A 測線を除き縦横 (水平・深度) の比率は 1:1 で作成しています。

3-5-2 探査結果のまとめ

A 測線 (図 3-5-1a)

MMA-1、2、3 の 3 探査地点で探査を行い、このうち MMA-2 では(近藤ほか 2006)で示された松本盆地東縁断層を横断するチェーンアレー探査方式を採用しました。

- ・ 深度 200m 程度まで解析した結果、全体に西から東に緩く傾斜する速度構造が推定されました。
- ・ 比較的浅い深度 (深度 30~50m) から $V_s=500\text{m/sec}$ のややはやい速度層が分布します。
- ・ MMA-1 の表層付近には $V_s=200\sim300\text{m/sec}$ の軟質層が分布しますが、MMA-3 にはその速度層は見られません。
- ・ MMA-2 のチェーンアレー探査から、浅層の構造は複雑ですが、速度層の連続性からは松本盆地東縁断層に相当するような大きな西側落ち込みの構造 (速度ギャップ) は確認できませんでした。
- ・ チェーンアレー探査では東端部 (右側) で比較的硬質な層が東側に向かって浅くなる傾向がみられますが解析 S 波速度構造では明瞭ではありませんでした。
- ・ 松本盆地東縁断層の通過位置は、従来の研究で想定されている位置(MMA-2 付近)より東側の奈良井川沿いに存在する可能性が高くなりました。

B 測線 (図 3-5-1b)

- ・ 深度 1,000~1,600m における基盤 S 波速度は $V_s=3,000\text{m/sec}$ と解析され、これは密度が大きく緻密な基盤層 (美濃帯中生層?) に相当しています。
- ・ それより上位の堆積層の S 波速度は $V_s=1,600\text{m/sec}$ 台以下で、基盤層とは大きな速度差があります。
- ・ MMB-1 と MMB-2 の間に 430m 程度の西側落ちの基盤層の高度差が認められます。この位置は松本断層 (酒井 2002、Kondo ほか 2008) の南方延長にあたります。
- ・ 松本盆地東縁断層を南方に延長すると MMB-3 付近を通過するものと推定されますが、MMB-2 から MMB-4 の間には基盤層やその上位層の速度構造に大きな変位が認められませんでした。
- ・ MMB-4 と MMB-5 の間に 535m の基盤層の高度差 (東側が低い) が認められました。これより西側の MMB-5、MMB-7 間で推定される基盤層の傾斜と比べると非常に大

きな変位量が想定されます。

- ・基盤層($V_s=3,000\text{m/sec}$)の変位とその上位層の変位傾向—とくに $V_s=1,300\text{m/sec}$ 層—に注目すると、上位層は基盤層ほど大きな変位量(標高差)を示していないことから、こうした変位傾向は長期間にわたる断層運動の累積により形成された可能性が高いことがわかります。

D 測線 (図 3-5-1c)

- ・深度 700～2,000m の基盤 S 波速度は $V_s=3,000\text{m/sec}$ と解析され、これは MMB 測線と同様、緻密で堅硬な基盤層(美濃帯中生層?)に相当する速度です。
- ・それより上位の堆積層の S 波速度は $V_s=1,500\sim 1,600\text{m/sec}$ 以下であり、基盤層とは大きな速度差があります。
- ・MMD-7 は基盤深度が 2,070m と、今回得られた基盤深度の中では最も深い位置にあり、それより西側では全体に基盤が浅くなる構造が見られます。
- ・D 測線は、西側から東側へかけての基盤傾斜と東側の大沈降、盆地東端部における大きな上昇変位を示しており、重力異常(原山ほか 2009)や反射法地震探査による構造(池田ほか 2010 など)と調和的な構造が推定されます。
- ・MMD-1 と MMD-5 の間の基盤層($V_s=3,000\text{m/sec}$)には 650m におよぶ高度差が存在します。この高度差は断層以外では説明が難しい変位量です。両探査地点の間にある MMD-3 (深部解析不能)では地層の不連続など水平成層構造が成り立っていない可能性があり、MMD-3 付近には浅い構造まで乱すような構造変位(活断層?)が存在している可能性があります。
- ・MMD-5 と MMD-7 の間にも最大 715m の基盤層の大きな高度差とその上位層の変位があります。これは 630 松本地震の震央に近い位置です。両探査地点の間には MMD-6 がありますが MMD-3 と同様に深部構造が解析できませんでした。MMD-6 から MMD-7 にかけての地下にも大きな構造変位(活断層?)のある可能性が高いです。
- ・MMD-7 と MMD-8 の間の基盤層上面深度は、西側が 195m ほど高く、MMD-8 と MMD-10 の間では東側の基盤層上面が 154m ほど高くなっています。この付近は 2011 地震の余震域にあたり、地震断層の派生ないし同系統の断層が存在する可能性があります。
- ・MMD-10 から MMD-12 にかけては、西側に緩く傾斜する基盤構造が推定されます。しかし MMD-12 と MMD-14 の間には 780m の基盤の高度差があり、その西側の MMD-16 と MMD-14 間の基盤傾斜より大きい結果となりました。したがって、MMD-12 と MMD-14 の間にもなんらかの構造変位(伏在断層)が存在する可能性が高いと考えられます。

3 測線の探査結果の比較

B 測線、D 測線とも、西側のほうが東側より浅い深度に速い速度層が分布する傾向がみられました。

また、D 測線のほうが B 測線より基盤($V_s=3,000\text{m/sec}$)深度が全般に大きい傾向があります。しかし東端部では B 測線のほうが D 測線より基盤が深いことなど、B 測線

と D 測線の間は漸移的に基盤深度が浅くなるような単純な構造ではないことを示しています。

今後、反射法探査データ、重力異常データ、ボーリングデータや周辺地域の地質構造、特に浅所の地層まで変位させるような活断層を総合的に検討して、松本盆地の地下構造を明らかにしていくことが重要でしょう。

3-5-3 探査結果に基づいて推定された伏在断層

また、図 3-5-3a に基盤層 ($V_s=3,000\text{m/sec}$) 上面深度および $V_s=1,300\text{m/sec}$ 速度層上面深度を示します。図 3-5-3b では 5 万分の 1「松本」地質図を基図とし、隣あう探査地点の基盤層 ($V_s=3,000\text{m/sec}$) 上面深度に大きな標高差が認められた箇所を示し、その標高差も記しました。

以上の結果から推定される伏在(活)断層の位置を図 3-5-3c に示しました。実線はすでに報告されている活断層を示し、線の太さは変位量の大小を示しています。破線部は今回の微動アレー探査結果に基づいて推定された伏在(活)断層で、線の太さは同じく変位量の大小を示しています。以下に主要な伏在活断層について解説を加えます。

B 測線と D 測線で確認された 400m 以上の大規模な基盤岩変位を示す伏在断層は 3 本あり、いずれも松本盆地の伸長方向に近い南北系の断層と推定されます。

この 3 本のうち最も東側の断層は MMB-2 付近から MMD-3 に連なると推定され、東側上昇の変位センスを示すことから、市街地を南北方向に走る松本断層(活断層)の南方延長である可能性が高いと考えられます。

主要な 3 本の断層のうち、東から 2 本目の断層は MMB-4 付近から MMD-6 と MMD-7 の間を通過すると推定され、同じく東側上昇の変位センスを示します。この伏在断層は合同庁舎付近で鳥居山・城山公園の東側を走る活断層（近藤ほか 2006 など）によって断ち切れ、この断層を挟んだ北方延長が松本盆地東縁断層に連なると考えられます。

3 本の伏在断層のうち西側の断層は今回の探査の中では 780m と最も基盤岩変位量が大きく、東側の 2 本の伏在断層と異なり、西側上昇の変位センスを示します。この断層は 100m 以浅の地表に近い部分まで変位が確認され、活断層の可能性が高いと判断されます。なおこの西側の伏在断層は D 側線でのみ確認されており、北方への延長についての情報は今のところ得られていません。

このほか、630 松本地震の震央付近 (MMD-8 付近) にも 100m を超える基盤岩変位の断層が推定され、上記 3 本の伏在断層の変位量より小さいものの、深部から浅所まで変位が確認されることから、長期にわたって活動を繰り返してきた断層である可能性が高いと考えられます。

今後は推定された各伏在断層の地表到達部を横断するチェーンアレー探査により、地表付近の地層の変位を精査して、活断層としての評価を行う必要があるでしょう。

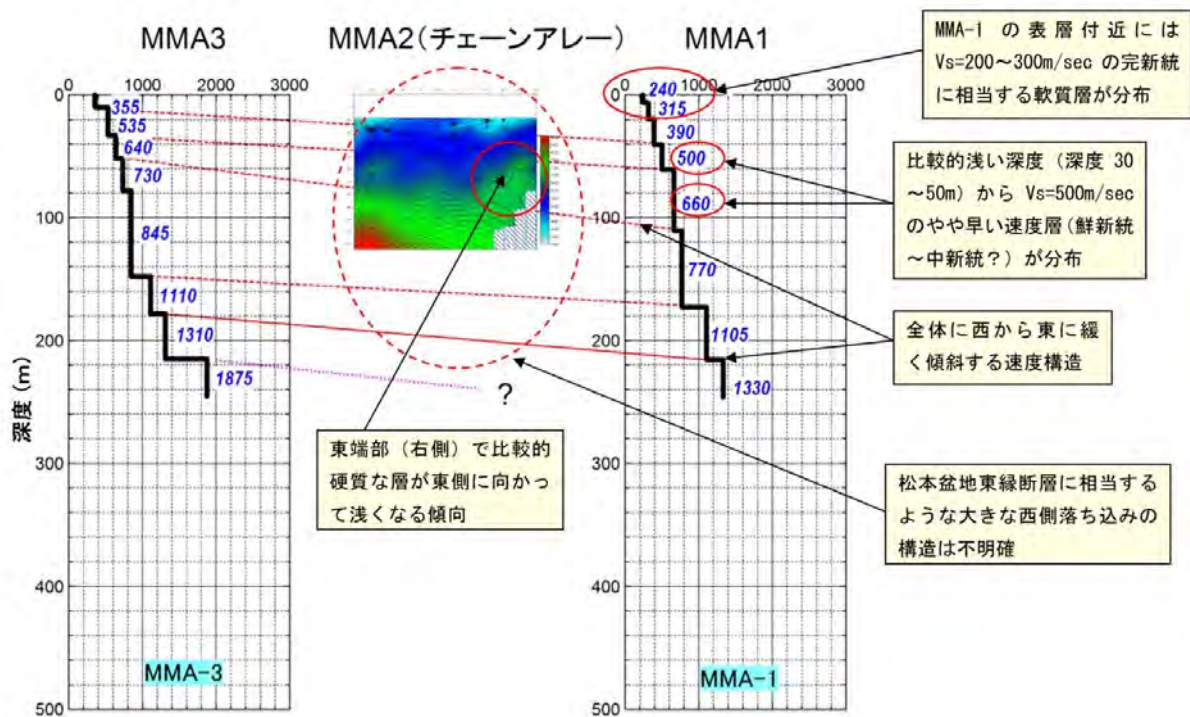


図3-5-1a A 測線 の速度層対比断面図

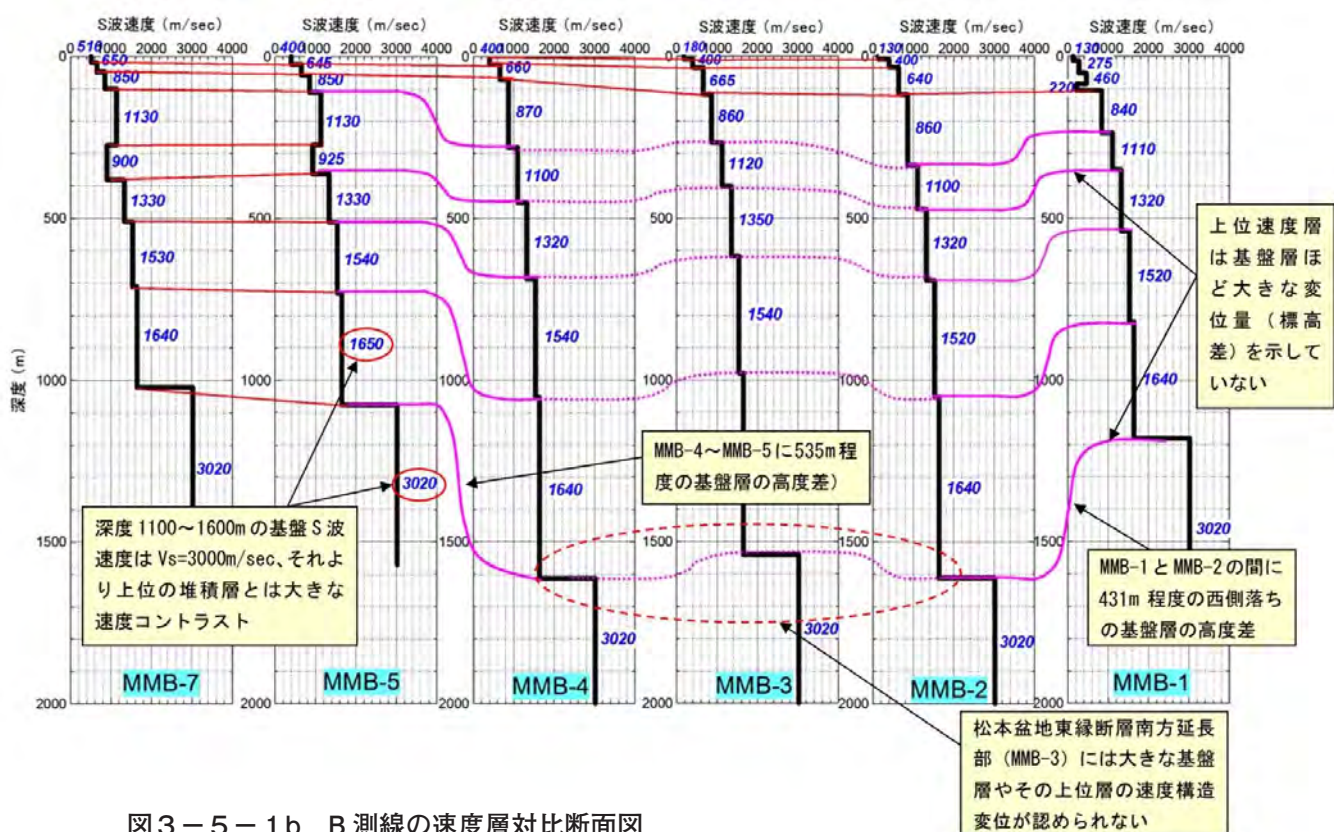
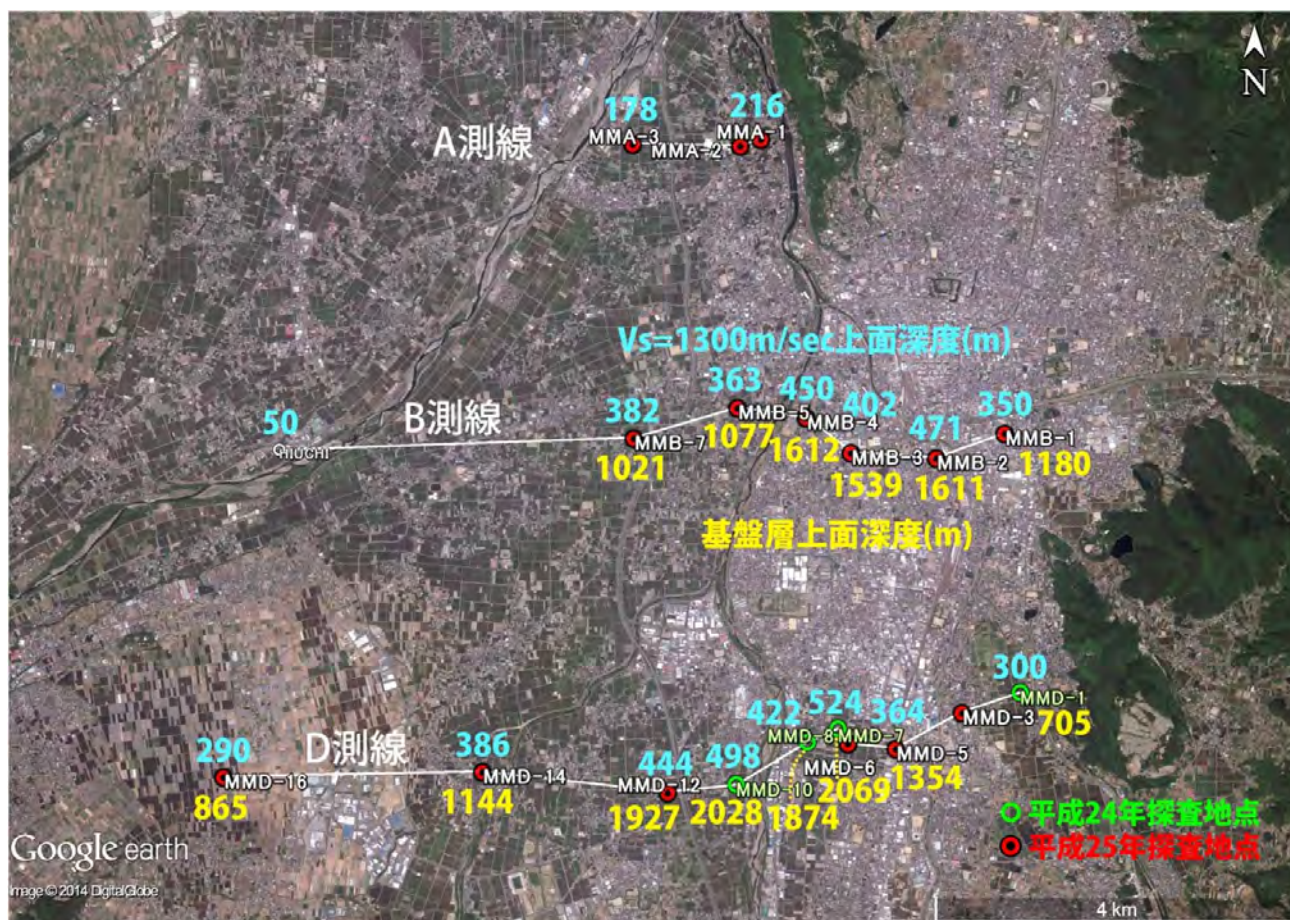
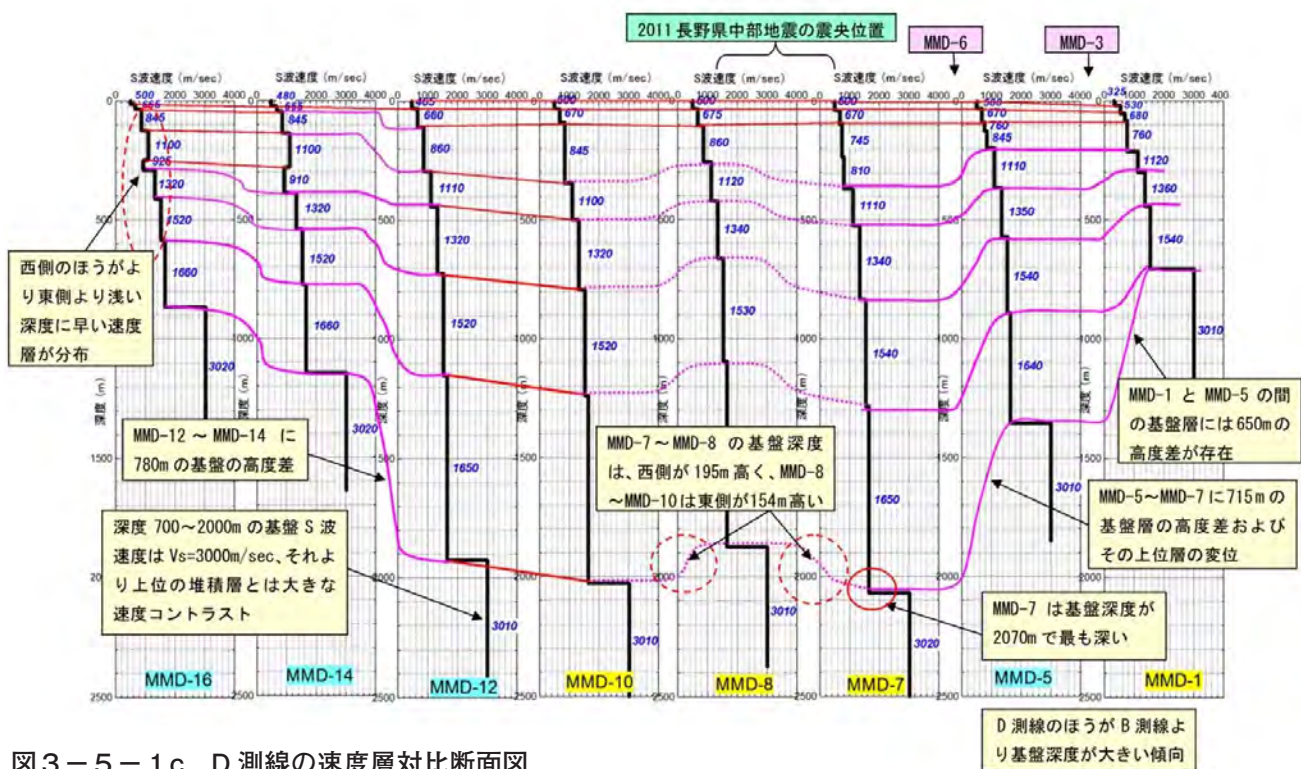


図3-5-1b B 測線 の速度層対比断面図



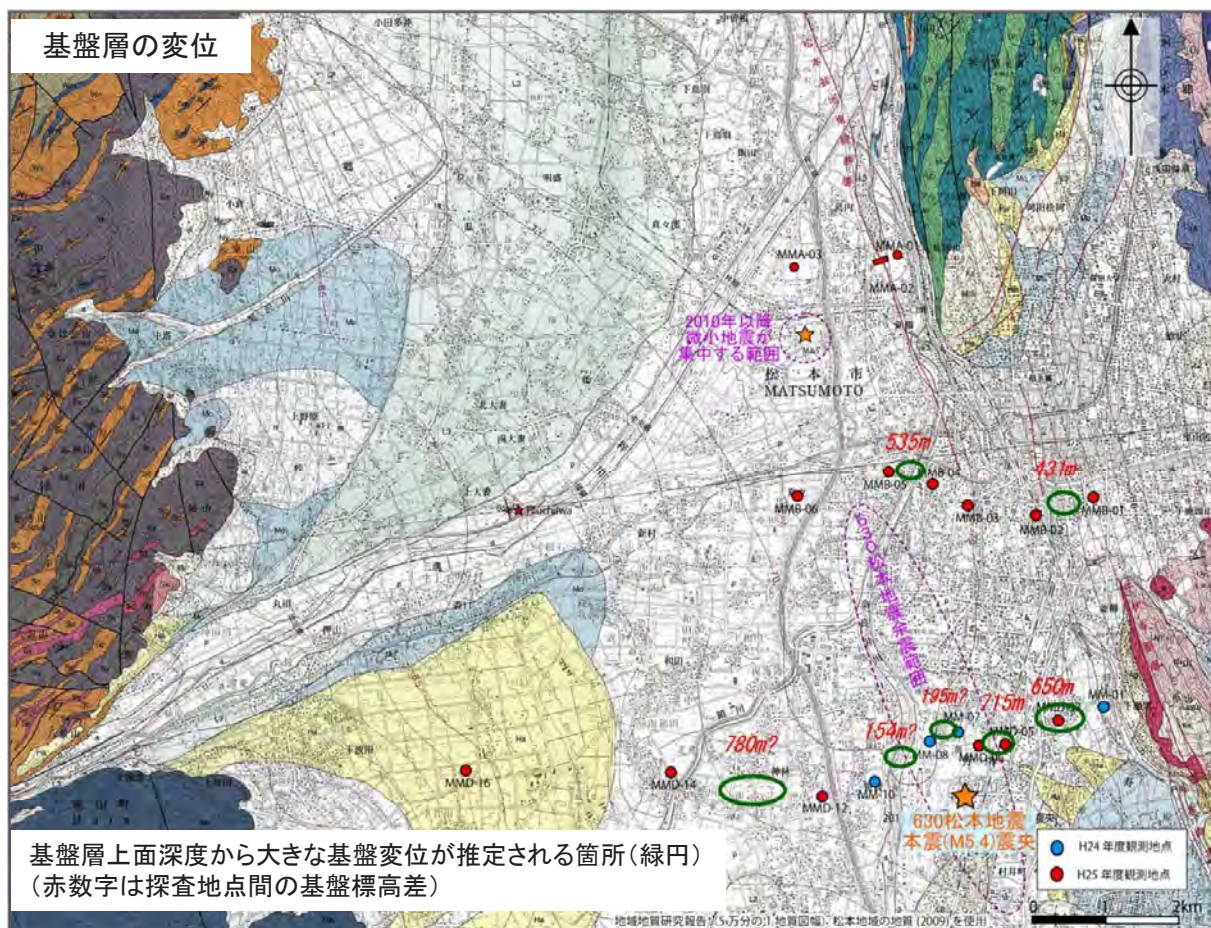


図3-5-3b 基盤層の上面深度と変位の推定位置

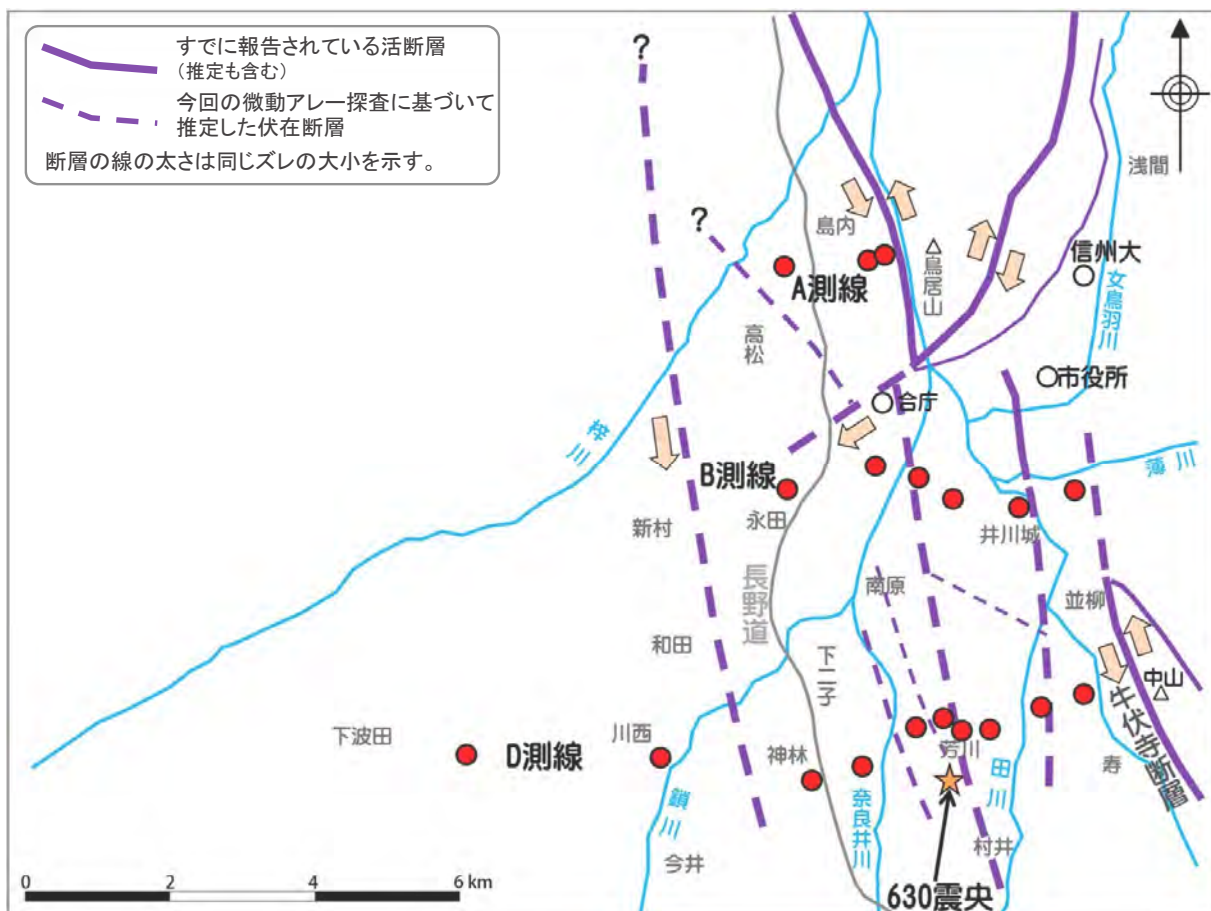


図3-5-3c 微動アレー探査によって推定された松本盆地南部の伏在断層

4 松本平とそれを取りまく大地のしくみ

4-1 山地の隆起・浸食と堆積作用がつくった松本平

北アルプスは、200 万年ほど前頃からマグマの活動を伴いながら激しい隆起を繰り返してきたところです。松本平をはさんでその東側に広がるフォッサマグナの山々も同様です。その過程で山が削られ、東西両側、特にアルプス側からたくさんの礫や砂・泥などが大量に運びだされました。松本平は、それらの厚い土砂で埋め立てられています。松本市の中心市街地は、女鳥羽川や薄川、田川・牛伏川・奈良井川・鎖川などの多くの河川が集まっているところです(図 4-1)。そのことは、この地域が周辺部に比べて相対的に標高が低く、堆積物も上流部より細かなものがたくさん堆積する傾向にあることを示しています。現在の河川は整備が行き届いているので流れは堤防の内側に限定されています。しかし整備が十分でなかった時代はどの河川も大水が出るとしばしば氾濫して流れを変えていたのです。一見すると同じような高さが広がっているところでも、地下の地層は土砂を運んできた河川のような違いを反映して場所によってさまざまな違いをもっています。現在の建築基準法では、橋や道路、ビルなどどんな建築物に関しても耐震基準が厳しく定められ、それに関して正確な地盤のデータが必要とされています。また、地震による都市災害をできるだけ軽減するために、地盤データにもとづいた震度予測図(揺れやすさマップ)を作成する行政機関も次第に増えてきました。

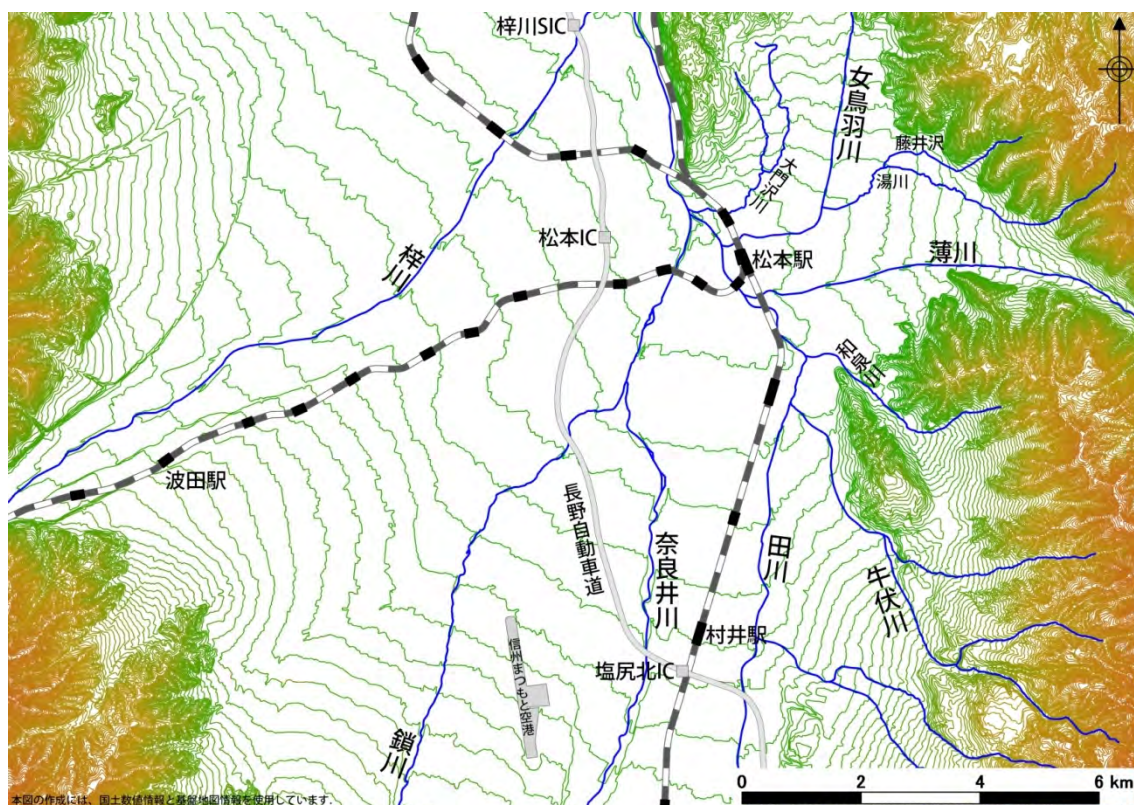


図 4-1 松本盆地南部の地形概略図

私たちは、630 松本地震の教訓を生かし、松本市内でこれまでに掘削されたボーリングのデータをできるだけ集め、それをもとに地表近くの地盤の状況を解析し、「松本市の地

盤図」としてまとめました（3-1、3-3の各地盤図を参照）。10数年前の地盤図にくらべ、その精度は格段に上がっています。

4-2 糸魚川―静岡構造線のはしる松本平

松本市の大半の市民が暮らしているのは、南北に細長い松本盆地（松本平）のほぼ中央部にあたるところです。西側は上高地・槍穂高連峰を擁する北アルプス、東側は美ヶ原高原を中心とするフォッサマグナの、どちらもけわしい山岳地帯です。この東西両側の山地をつくる岩石は大きな違いを持っています。それは、松本盆地のほぼ中央部を南北方向に縦断して糸魚川-静岡構造線という大断層が走っているためと考えられています（図4-2）。しかし、これまでの研究や調査では、この断層がどこを通るのか？ 落差はどれくらい？ 1本だけの断層なのか、複数なのか？ 連続しているのか、断続的なのか？ など断層の具体的な性質はあまりよくわかっていないのです。630松本の地震は、松本市南部の芳川付近の地下4.3km地点を震源とする地震でした。その余震の震源分布をみると地下で割れて動いた岩盤（断層）の方向は、推定されている糸魚川-静岡構造線活断層系ともほぼ一致しています。3年前の地震は、松本平の地下にまだ知られていない断層が伏在することを強く示唆する地震だったのです。私たちは松本平の深部の地下構造についても調査しました。その結果、伏在する複数の断層の存在を明らかにし、得られた新しい事実を報告書に盛り込みました（3-5参照）。この事実も、今後の松本平の地震防災を考える上では極めて重要なことでしょう。

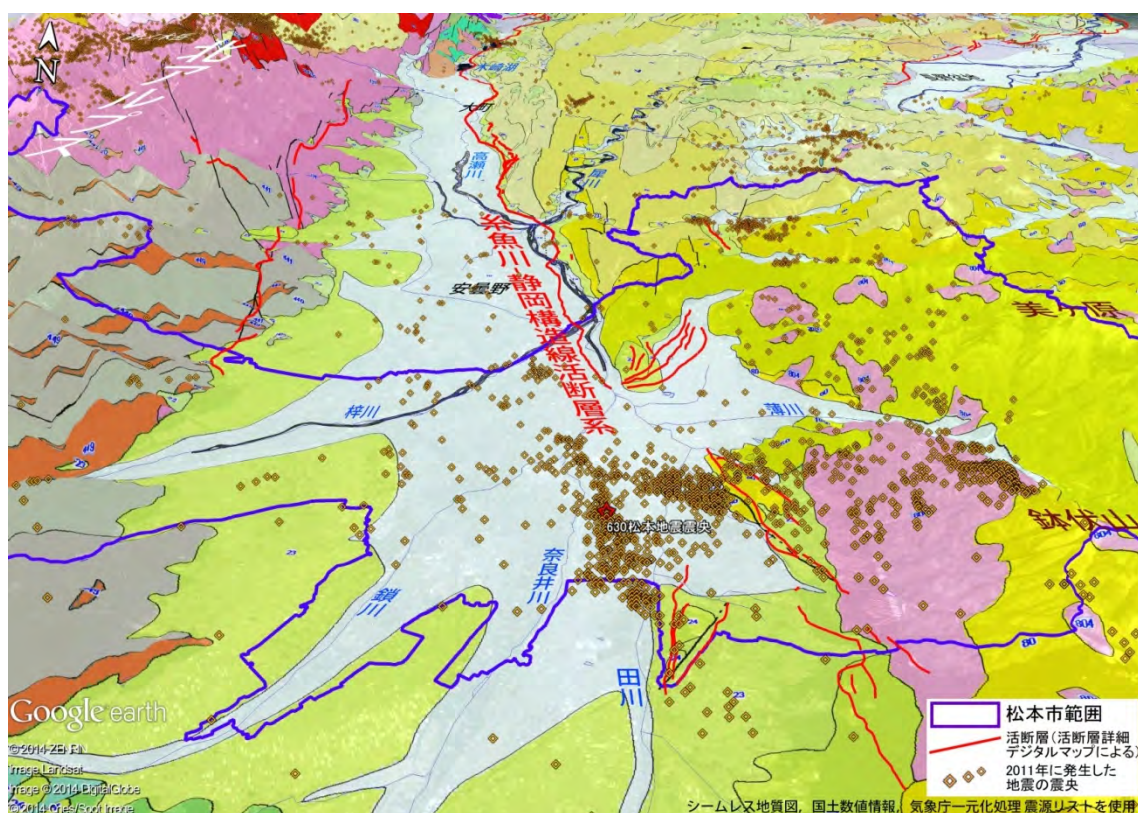


図4-2 松本盆地周辺の地質（鳥瞰図）

5 用語解説

ボーリング調査

中空の鉄管を専用の機械で回転させながら地中に押し込んで、地下の地層や岩石のようすを調べる調査です。試料を直接採取して岩石の種類や粒子の大きさ、重さ・硬さなどのさまざまな物理的な性質を解析したり、地下水のようすなどを調べることで地下の地盤の性質などを明らかにする調査です。地震の際の地表の揺れは、地盤の性質に強く関係しています。今回は松本市だけで約 2,000 本のボーリングデータが解析されました。

N 値

ボーリング調査の際に実施される試験に、標準貫入試験というものがあります。63.5 kg の重りを 75cm の高さから落として 3.5cm の孔が開いた直径 5.1cm の鉄管を 30cm 打貫入させる試験です。その貫入に必要とした打撃回数を N 値と呼びます。地盤の固さ（軟らかさ）を示す数値で、N 値 50 を目安としてそれよりも低い N 値であれば比較的軟らかい地盤とみなされます。

礫・砂・泥

松本平には、河川によって運ばれて河川敷や沼地などに堆積した礫・砂・泥などからなる地層が厚く堆積しています。ボーリングによる柱状断面図にそれが示されています。堆積物は粒子の大きさによって分けられます。礫は径 2mm 以上、砂は径 0.063mm 以上 2mm 未満、泥は 0.063mm 以下の粒子です。礫はバラス・砂利・玉石等、砂は砂場の砂、泥は田んぼの作り土や畑の土をイメージしてください。

埋土・盛土・表土

地盤の表層部は、田畑やさまざまな工事などで人為的に改変されている場合がよくあります。これらの言葉は、人為的に施工されたことが明らかな表層部の地層に対して用いられる表現です。もともと低かった土地を埋め立てたものは埋土、周囲よりも高く盛られたものは盛土、田畑や草地等に分布している土については、単に表土と表現されます。この 3 つの表現は、土粒子の大きさとは関係ないことだけ理解をしてください。

土質区分

地盤を構成している地層を、含まれている礫・砂・泥などの割合によって区分することを土質区分と言います。「礫混じり砂」は礫を少し（5～15%）含む砂、「砂質土」は砂を 15～50% 含む土などという意味で用います。その他にもさまざまな表現が用いられますが、地震の際に地盤がどのように揺れるかは、この土質区分がとても重要な要素になっています。

建築支持基盤（工学的基盤）

建築支持基盤とは、ビルや橋梁などの構造物を支える強さをもった良好な地盤を表すこととしました。

その指標は、砂質土・砂礫地盤ではN値が 30 以上、粘性土地盤ではN値が 20 以上とし、ある程度の厚さを有し、連続している地盤です。

同様な呼び方として、土木建築分野では「工学的基盤」が使われます。これは地震の横波が伝わる速度（S 波速度）が $V_s=300\sim700\text{m/sec}$ となる良好な地盤とされています。また、一般の住宅建築物の支持地盤は、建物の重さによって異なりますが、戸建て住宅は荷重が小さいため、N値 3 以上で支持地盤としており、いずれも今回の建築支持基盤とは異なる定義です。

軟弱地盤

雨によってけずられた砂や粘土が川から海へ流れ出る中でユックリと堆積する環境の所^{（注1）}でつくられる軟らかい粘土やゆるい砂からなる地盤。地震時の液状化や建物の基礎地盤とした盛土した場合には沈下や側方移動をおこすおそれがあるほか、震度 5 以上の地震に見舞われたときに変形や液状化が発生するおそれがあるので、事前の地質調査が必要なところ です。

本書では、N値 4 以下の粘土、シルトおよびN値 10 以下の砂質土を軟弱地盤としています^{（注2）}。

（注1）堆積環境

- ①主川の自然堤防や海岸砂州等でとざされた谷に堆積（おぼれ谷）
- ②自然堤防背後の低地に堆積（後背湿地）
- ③河口付近の三角州に堆積（三角州低地）
- ④旧河道や砂丘間の低地に堆積
- ⑤溜池や海岸地帯の埋立地

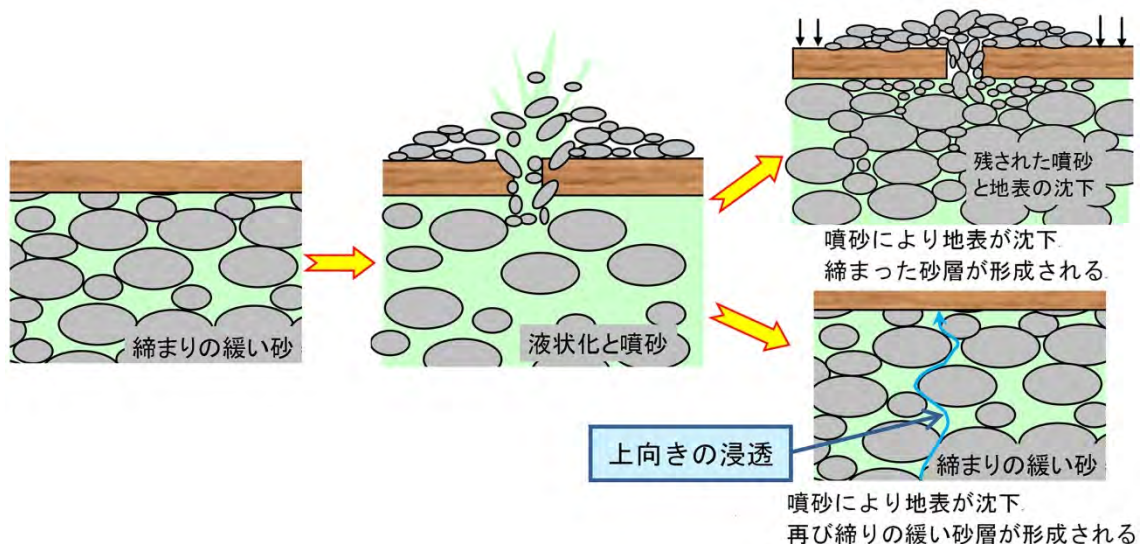
松本地域での軟弱地盤地帯は、後背湿地（奈良井川沿い、女鳥羽川沿い、田川沿い）、旧河道（蟻ヶ崎、奈良井川沿い）、松本駅周辺（旧河道もしくは、構造運動による沈下帯）が該当します。

（注2）各指針の軟弱地盤の定義

- ①軟弱地盤技術指針（案）住宅都市整備公団、昭和 59 年 1 月
粘土地盤＝N値 2 以下
砂質地盤＝N値 10 以下
- ②道路土工「軟弱地盤対策工指針」、日本道路協会、平成 24 年 8 月
粘性土＝N値 4 以下
砂質地盤＝N値 10～15 以下
- ③設計要領「土工編」、高速道路総合技術研究所、平成 25 年 7 月
粘性土＝全層厚 10m 未満；N値 4 以下、全層厚 10m以上；N値 6 以下
砂質地盤＝N値 10 以下

液状化

液状化は、地下水に満たされた締りの緩い砂層が地震などの揺れによって水の様に変化する現象です。締まりの緩い砂層は粒子と粒子の間の隙間が広く、地下水位が高いとその隙間は水で満たされた状態になっています。地震などで揺すられると粒子は急速に間隔を詰めてより安定した粒子配置になろうとしますが、隙間にある水は粒子が邪魔して瞬時には移動できません。隙間を詰めようとする砂に抵抗して水の圧力(間隙水圧)が高まり、ついには砂が水に浮いた状態となります。



液状化現象が起きると

液状化した砂は支持力を失い、比重が 1.0 以上の液体となるので浮力が増してマンホールなどを浮上させます。また、表土やアスファルトを破って地表に噴砂を生じます。重要な点は、一度、液状化を被った地盤が、次の地震で再び液状化を起こす事例が多いという点です。液状化現象の経歴などを調べることは大きな意味があります(写真は東日本大震災時の千葉県での被害)。



液状化による電柱の倒壊



マンホールの浮上

松本市でも記録がある液状化現象

1847年(弘化4年)長野市を震源とした善光寺地震では、「出川町渚村小嶋村其外道筋 丈け5,6尺 幅5,6寸 地割、泥押し候処所々に有候出川町は格別にもゆれ強く、土蔵屋根瓦ゆり落とし、…」(「信濃大地震記」)とあり、遠く離れた松本市でも液状化現象が発生していたことがわかります。

微動アレー探査

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1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。表面波（レイリー波）の最大の特徴は、伝播速度（位相速度）が周波数によって変化する点であり、低周波ほど位相速度が大きいことです。位相速度が周波数によって変化する現象を分散現象と呼び、これは地中を進む実体波（P波やS波）にはみられない性質です。微動アレー探査は表面波のこうした性質を利用した探査法であり、深部の情報を反映した低周波（長波長）と地下浅所の情報のみを反映した高周波（短波長）の位相速度を分離していくことで位相速度と周波数との関係を示す分散曲線を描くことができます。分散曲線は地下の深部から浅所までのS波速度構造[地層深度・地層の厚さ・地層を伝わるS波速度]を反映しているので、初期モデルS波速度構造から出発して最も観測した分散曲線に近い曲線を描くように[]内の3種類の数値を変えながら解析を行うことで、探査地のS波速度構造を求めることができます。

地震波の種類

地震波にはいくつかの種類があり、P波やS波と呼ばれる波動がよく知られています。これらは震源から地中を伝わってくる波動（実体波）です。一方、地面に沿って伝わっていくのが「表面波」で、実体波もいったん地表まで到達すると波の性質の異なる表面波として伝わります。

微動

震源を特定できない微小な震動で、自動車などによる人為的な震動や、風や波浪などの自然現象によるものがあります。微動アレー探査では自然現象による微動を観測します。地表面で観測される微動は表面波の性質が強いので、微動アレー探査に使うことができます。

S波速度構造

地層はその性質の違いにより、様々なS波速度(V_s ;単位はメートル/秒)をもっています。それぞれS波速度の異なる地層が、どれくらいの厚さで、どのような順序で積み重なっているか、をS波速度構造といいます。S波速度構造が分かると実際の地層の積み重なりを推定することができます。

フォッサマグナ

「大きな溝」という意味のラテン語が語源のフォッサマグナは、本州中央部を太平洋から日本海にかけて広がるエリアです。松本盆地は、その西縁を走る糸魚川 - 静岡構造線という大断層沿いの盆地です。その周辺に活断層が多数見られるのは、この断層が現在も活動的だということを示しています。今回の微動アレー探査で、この断層の正確な位置について重要なデータが得られました。

6 むすび

私たち信州大学震動調査グループは、3年前の平成23年6月30日発生の松本地方を襲った地震直後から活動を開始し、この松本平が地震に対してどのような性格を持っているのかを地質学的、地震工学的な立場から明らかにしようと調査・研究を続けてきました。

今回まとめられた内容は松本市地域に限定されたものですが、地震時の揺れ方には地盤の違いを反映して地域差が非常に大きいことが明らかとなりました。地震に強い街づくりを考える上で、この結果は大いに役に立つだろうと考えています。また、このような調査が松本平全域にわたって実施されることも必要だろうと考えています。

ところで、今回私たちが取り組んだ松本市との共同事業には次のような特徴があります。

第一は、通常このような事業は、自治体が民間の専門会社に委託して実施されるのですが、今回は松本市と信州大学（震動調査グループ）の共同事業として計画・実施された点です。専門的な調査・研究は震動調査グループが担当し、それにかかわる費用等を市と大学が負担したのです。

第二は、今回の調査・研究が、信州大学、長野高専、県立研究機関・高校等に勤務する地質や工学の研究者、県内の民間等の専門技術者などが自発的に参加した専門家チーム（震動調査グループ）によって組織的に実施されたことです。また、この事業が多くの関係機関、各町会をはじめとする市民の協力を得て実施された点も大きな特徴でしょう。

地震などに対する地域防災を進めてゆくには、大学の研究者や民間の専門技術者らが、地域に研究成果をわかりやすく提示していくことが必要であることは言うまでもありませんが、それと同時に大学、関係行政機関、企業、市民等が連携した防災への取り組みをすすめることが大切だろうと思います。

今回の成果はまだその一步にすぎませんが、県内の他市町村での今後の地震防災への取り組みに参考となれば幸いです。

謝辞

本事業をすすめるにあたり、以下にあげる多くの皆様にご協力を頂きました。

- ・本事業開始に先立つ地震動に関するアンケート調査では、松本市をはじめ塩尻市・安曇野市の関係行政機関、町会関係者や市民の方々、各市の義務教育関係者、各学校の児童・保護者の方々、信州大学松本キャンパスの教職員・学生の皆様にご協力頂きました。

- ・微動アレー探査の実施に際しては、探査地点周辺の市民の方々・町会の皆様、学校関係者にご理解を頂くとともに、地権者の方々には測量・観測時の立ち入り、地震計の設置等にご理解、ご協力を頂きました。

- ・ボーリングデータの収集に関しては、国・県など多くの関係機関にご理解とご協力を頂きました。

- ・ボーリングデータの整理・解析では、長野工業高等専門学校環境都市工学科古本研究室の学生さんたちに作業を支援して頂きました。

・微動アレー探査や探査データの整理・解析に関しては（株）地圏総合コンサルタントの
棚瀬充史氏をはじめ関係企業の多くの技術者の方々にご教示頂きました。

・「地盤情報活用システム Pro」の使用にあたっては、ジーエスアイ（株）の豊田守氏にさ
まざまな点でご教示いただきました。

以上を記して、皆様のご協力に心から感謝し厚く御礼申し上げます。

データ提供元

以下の各機関からデータを提供していただきました。

国関係	国土交通省関東地方整備局長野国道事務所
	関東地方整備局長野営繕事務所
	北陸地方整備局千曲川河川事務所
	国立病院機構（営繕関係）
長野県	信州大学
	松本建設事務所
	奈良井川改良事務所
	安曇野建設事務所
	大町建設事務所
	環境保全研究所
	松本地方事務所林務課
	松本地方事務所農地整備課
	建設部技術管理室
	建設部施設課
	危機管理部
松本市	住宅課
	建設課
	耕地林務課
関係団体	長野県地質ボーリング業協会
企業	中日本高速道路株式会社
	相澤病院
	有限会社アルプス調査所
	株式会社土木管理総合試験所
	株式会社サクセン
	株式会社北信ボーリング
	日本総合建設株式会社
Web	KuniJiban（国土交通省）
	KiK-net（防災科学技術研究所）

利用データ、ソフトウェア

データをまとめるにあたっては、以下に記すデータ、ソフトウェアを利用しました。

(地図関係)

図 3-3-A~J の左下図、図 3-3-k の背景地図には数値地図 25000 (地図画像) [松本,山辺,豊科,三才山]を使用しました。断面図の地表面は国土地理院の基盤地図情報 (10mメッシュ数値標高モデル) を用い描画しています。

図 3-1a、3-1b、図 3-3、3-3-A~J (右上図, 右下図)、3-5-3a の各背景地図には Google マップを使用しました。

図 3-3、3-3-A~J (左上図) の背景地図には松本市基本図を使用しました。

図 3-4a、b、c の作図には Google Earth Pro を使用しました。

以下に示す各図は、国土交通省の国土数値情報と、国土地理院の基盤地図情報を用い作図しました。

揺れやすさマップ-広域版 (図 3-2a) ; 国土数値情報 (鉄道, 高速道路, 河川, 行政区画)、基盤地図情報 (道路縁)

揺れやすさマップ-拡大版 (図 3-2b) ; 国土数値情報 (鉄道, 河川)、
基盤地図情報 (道路縁)

各地の揺れやすさマップ (図 3-3-C~J 左上) ; 国土数値情報 (鉄道, 高速道路)

ボーリング柱状断面図 (図 3-3-C~F、H、I 左下) ; 国土数値情報 (鉄道, 高速道路)

松本盆地南部の地形概略図 (図 4-1) ; 国土数値情報 (鉄道, 高速道路, 河川, 空港)、
基盤地図情報 (10mメッシュ数値標高モデル)

松本盆地周辺の地質 (図 4-2) ; 国土数値情報 (行政区画)

なお、図 4-2 には活断層詳細デジタルマップ、シームレス地質図、気象庁一元化処理震源リストも使用しています。

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 (図 S1) ;

国土数値情報 (行政区画)

新旧「揺れやすさマップ」の精度の違い (図 S2) ; 国土数値情報 (鉄道, 高速道路, 河川)

基盤地図情報 (道路縁, 10mメッシュ数値標高モデル)

(データ整理)

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)を使用しました。

デジタル化したデータを登録、整理にはジーエスアイ株式会社の「地盤情報活用システム Pro」を使用しました。

(地震データ)

震央データは Hi-net で公開されている気象庁一元化処理 震源リストに基づいています。気象庁一元化地震データは独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県及び神奈川県温泉地学研究所の地震観測データを使用して、気象庁が文部科学省と協力して整理したものです。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 土木学会(2002) 2002 年制定コンクリート標準示方書[耐震性能照査編], 土木学会.
- 岐阜県(2002) 岐阜県東海地震等被害想定調査報告書, 岐阜県.
- 岐阜県・地盤工学会中部支部・岐阜大学(2004) 活断層により想定される地震の地震動及び液化化指数の予測と評価報告書, 解説資料-1(EMPR)および解説資料-2(FDEL).
- 原山智・大塚勉・酒井潤一・小坂共栄・駒澤正夫 (2009)「松本」地域の地質 (5 万分の 1 地質図幅), 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社(2013) 設計要領第一集 土工編, 高速道路総合技術研究所.
- 池田安隆・岩崎貴哉・狩野謙一・伊藤谷生・佐藤比呂志・阿部信太郎 (2010) 断層帯の地下構造解明のための反射法地震探査および重力探査, 「糸魚川ー静岡構造線断層帯における重点的な調査観測」平成 17~21 年度成果報告書, 6-72, 文部科学省研究開発局・国土地理院・東大地震研究所.
- 住宅都市整備公団(1984) 軟弱地盤技術指針 (案), 住宅都市整備公団.
- 気象庁(2009) 気象庁震度階級の解説.
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/jma-shindo-kaisetsu-pub.pdf>
- 近藤久雄・遠田晋次・奥村晃史・高田圭太(2006) 糸魚川-静岡構造線活断層系・松本盆地東縁断層南部に沿う左横ずれ変位地形, 地学雑誌, 115, 208-220.
- Kondo, H., Toda, S., Okumura, K., Takada, K. and Chiba, T. (2008) A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: A Case study on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan. *Geomorphology*, 101, 731-739.
- 長野県建築士会松筑支部 編(1982) 松本平地盤図, 長野県建築設計事務所協会松筑支部・松筑建築安全協会・松筑建築安全協会.
- 中田高・今泉俊文 編(2002) 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会. (製品シリアル番号: DAFM3226)
- 日本道路協会(2012) 道路土工一軟弱地盤対策工指針〈平成 24 年度版〉, 日本道路協会.
- 小河史枝・杉浦綾子・杉戸真太・古本吉倫・久世益充(2006) 岐阜市域を対象とした地盤データベースの構築と詳細な地震被害想定, 土木学会中部支部平成 17 年度研究発表会講演概要集, 79-80.
- 酒井潤一・松本盆地団体研究グループ(2002)地震と防災 糸魚川 - 静岡構造線, 信濃毎日新聞社.
- 酒井潤一・松本平地盤図作成委員会 編 (2000) 松本平地盤図 2000, 長野県建築士事務所協会松筑支部・長野県建築士会松筑支部・長野県建築物防災協会松本支部・信州建築構造協会・松本市建設業協会.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2012) 20 万分の 1 日本シームレス地質図データベース(2012 年 7 月 3 日版), 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 信州大学震動調査グループ (2012) 「あっ、地震だ!」その時、どう揺れた?ーアンケートによる震動調査結果 (概要編)ー, 信州大学.
- 信州大学震動調査グループ (2013) 「あっ、地震だ!」その時、どう揺れた?ーアンケート形式による震動調査の結果・ボーリングデータによる松本平の地盤解析・微動アレー探査による深部構造解析ー, 信州大学.
- Sugito, M., Furumoto, Y., and Sugiyama, T. (2000) Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Auckland, New Zealand.
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫(1994) 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, 493/III-27, 49-58.

（資料編：本編と区別するために、資料編の図・表は S〇〇と表記しました）

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 S 1、図 S 1）。



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。

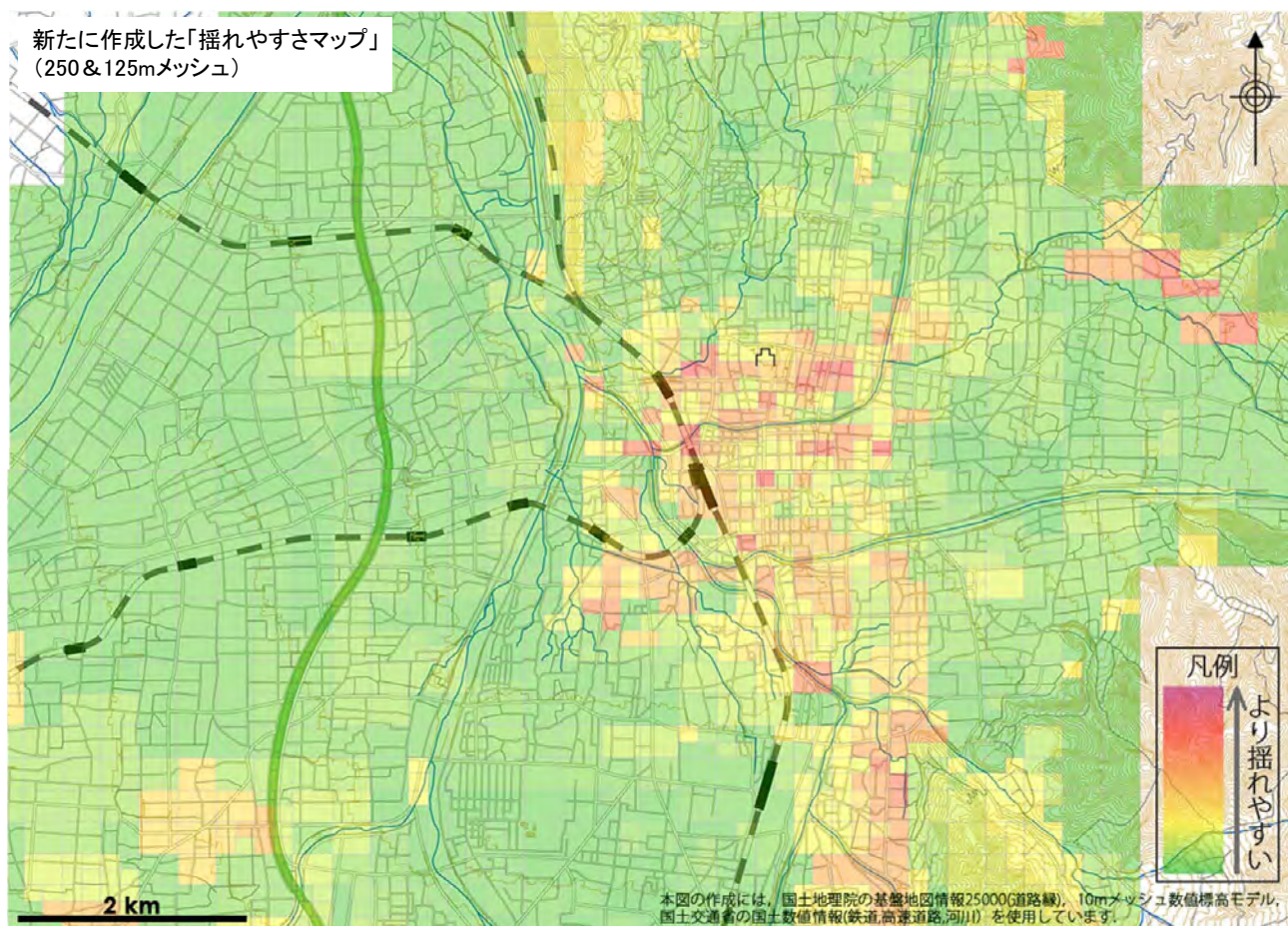
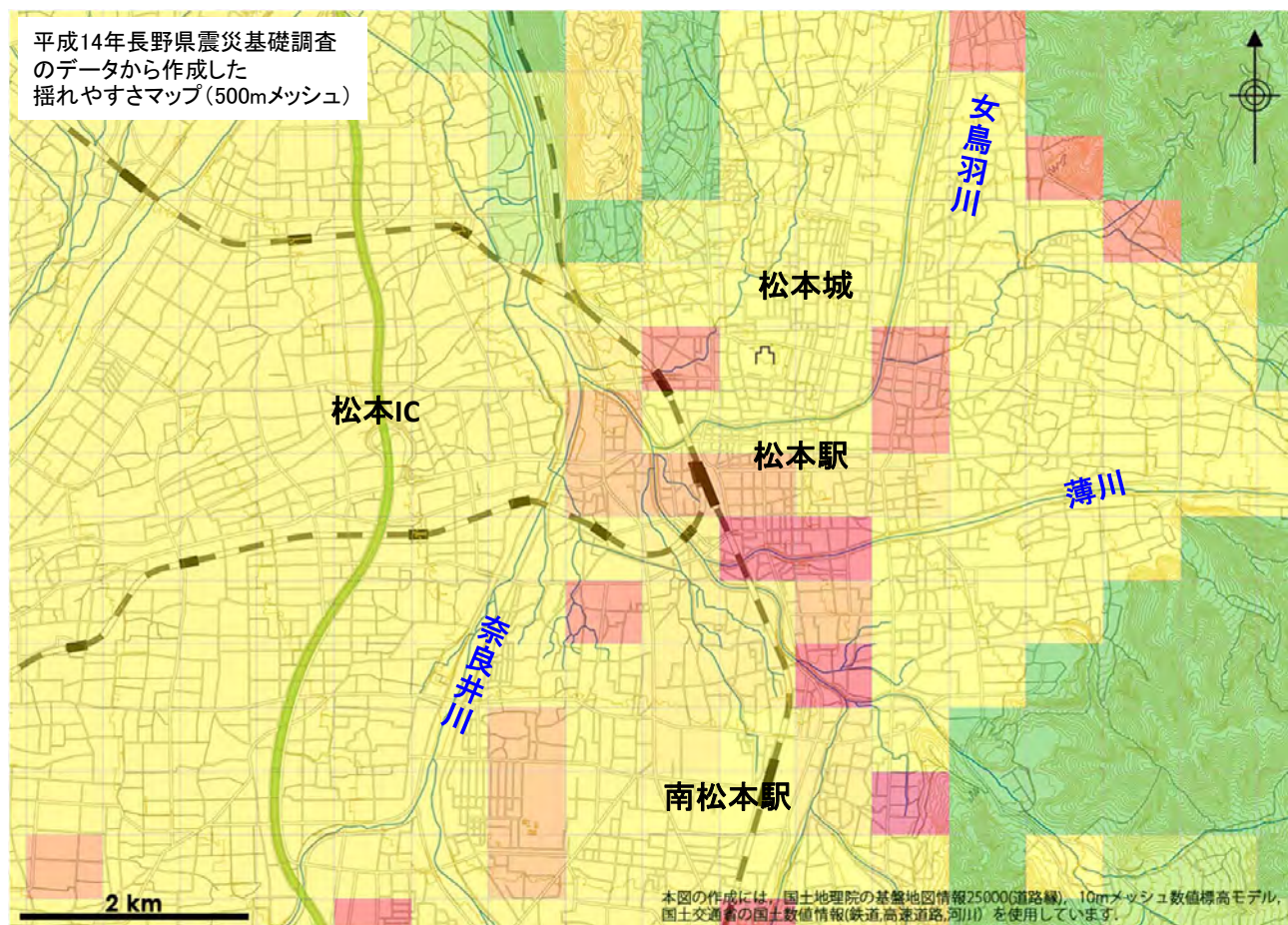
2-1-2 ボーリングデータのマッピングと断面図化

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) $4 < \text{N 値} \leq 8$: 粘土 3
- c) $8 < \text{N 値} \leq 20$: 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) $4 < \text{N 値} \leq 8$: シルト質土 3
- c) $8 < \text{N 値} \leq 20$: シルト質土 2
- d) N 値 > 20 : シルト質土 1

3)砂質土

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

4)礫質土

- a) $N \text{ 値} \leq 10$: 砂質土 3
- b) $10 < N \text{ 値} \leq 30$: 礫質土 2
- c) $N \text{ 値} > 30$: 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になります。

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すっ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にして作成した図で、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（パイブロサイズ）や爆薬が不要で、また高感度地震計（設置面積 15cm 四方形程度）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。

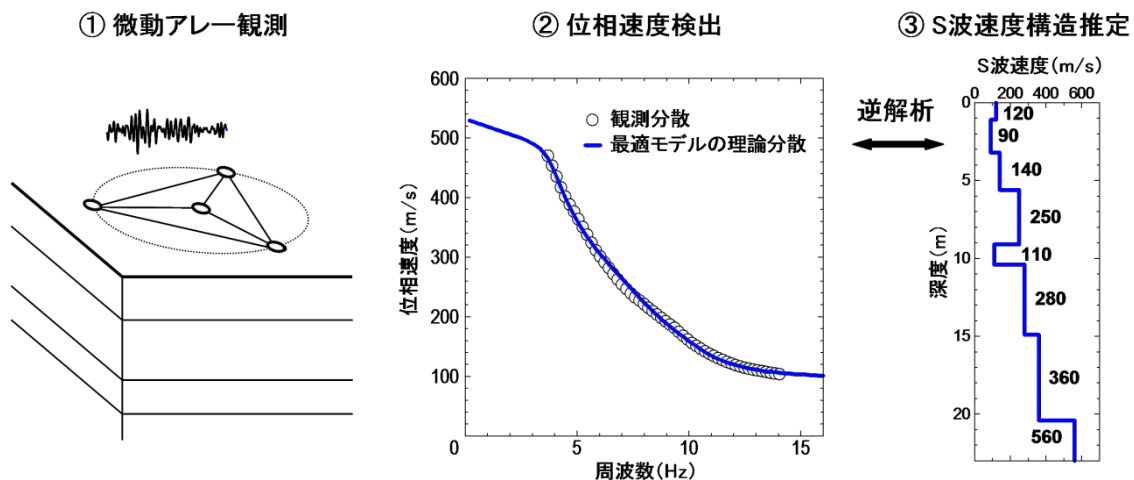


図 S 3 微動アレー探査・解析の流れ

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ヒーレンス関数(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

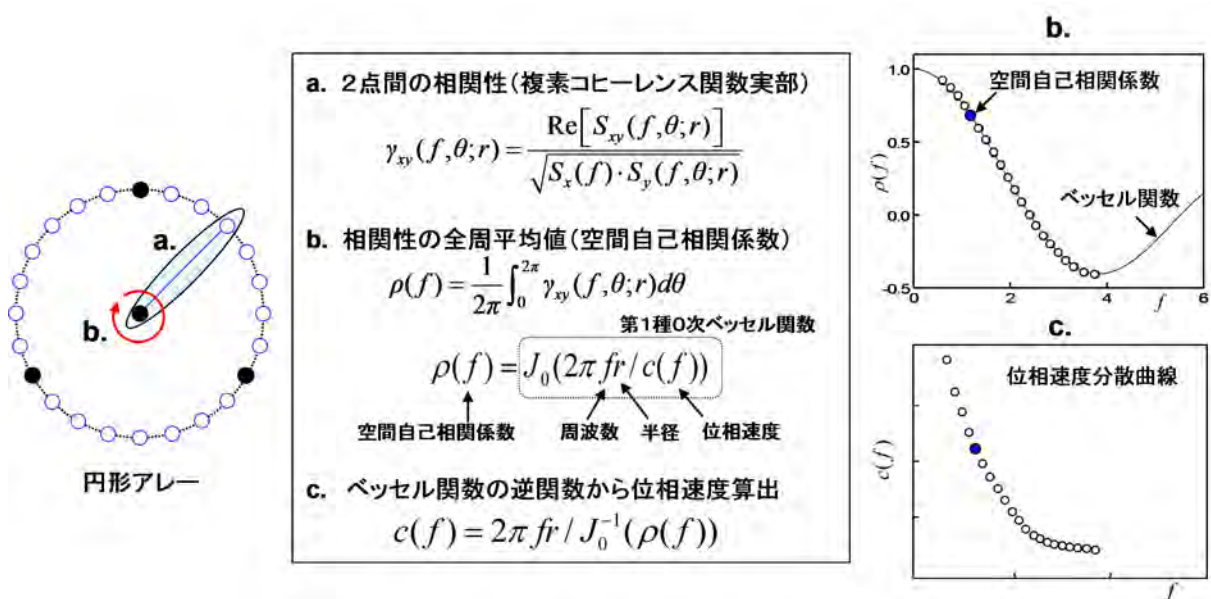


図 S 4 位相速度検出の方法（観測分散曲線）

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。

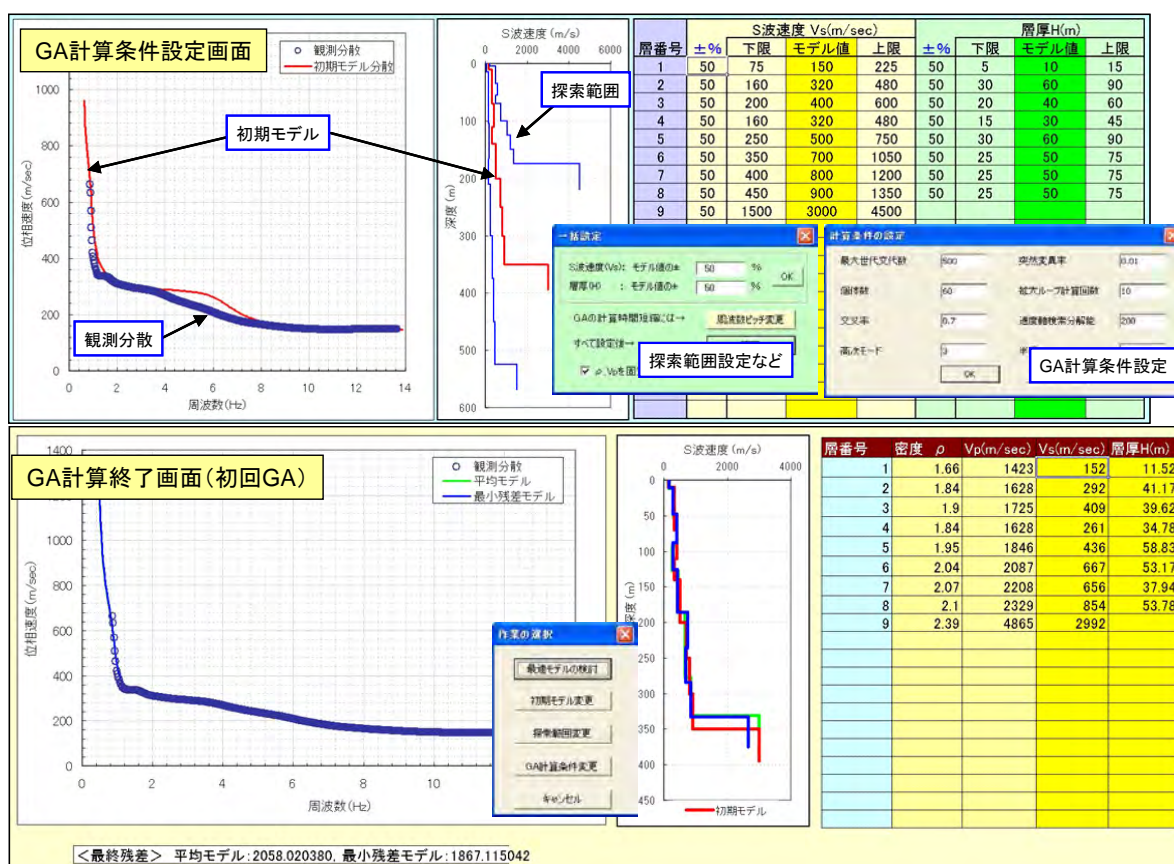


図 S 5 微動アレー探索 解析ソフトの処理画面

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。

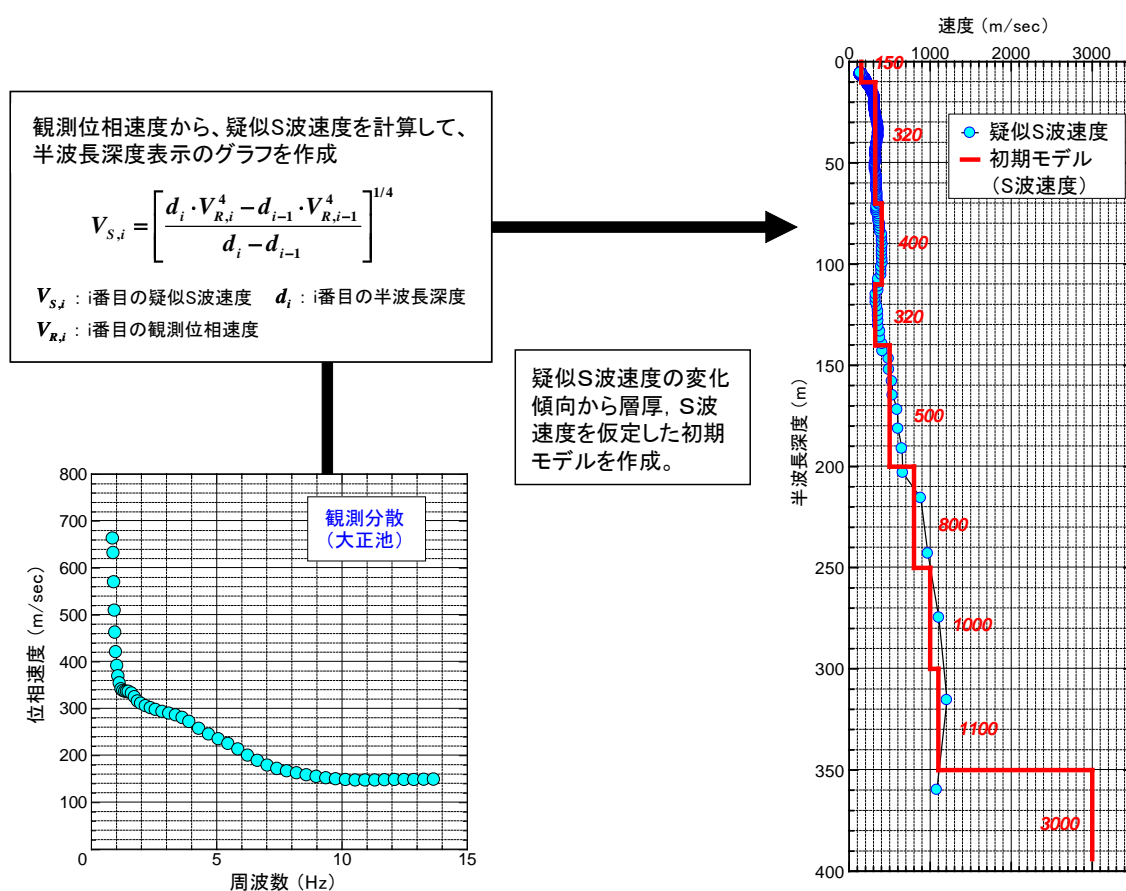


図 S 6 解析での初期モデルの作成手順

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

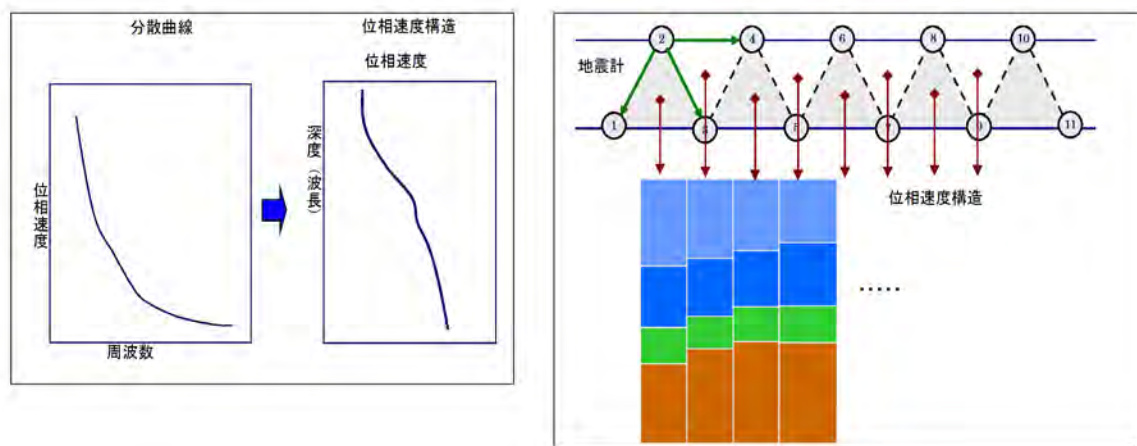


図 S 8 チェーンアレー探査における二次元位相速度解析

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