

3. 益城町市街地で発生した地震現象とその分析

3.1. 地質調査の項目及び数量

今回の地震の被害拡大要因を分析するために、益城町市街地の地盤状況（地層構成、土質特性等）及び活断層位置を把握することを目的として、下記及び表 3-1 に示す地質調査を実施した。

なお、地質調査実施地点は、図 3-1～図 3-3 に示す通りである。

◇ボーリング調査

- ・地層構造の把握を目的に、建物被害が甚大な範囲（鉄砂川の東側地域）、地形区分や他機関実施のボーリング地点との位置関係も考慮して計 7 地点に配置
- ・各地点とも当該地の基盤面相当として Aso-3 層が確認できる深度まで掘削
- ・標準貫入試験：全地点で土層の N 値把握を目的に実施
- ・PS 検層：地盤内を伝播する弾性波の速度構造の把握を目的に、ボーリング地点の地層区分を踏まえて、No.1-1（高位面）、No.1-3（低位面）、No.2-2（中位面）の 3 地点で実施

◇室内土質試験

- ・物理試験一式（土粒子密度、含水比、粒度、コンシステンシー）：土質材料の基本特性の把握、液状化の判定を目的に下記室内試験（動的変形、液状化、一軸）と併せて実施
- ・一軸圧縮試験：粘性土地盤のせん断強度の推定を目的に、ボーリング地点の地層区分を踏まえ、No.1-1（高位面）、No.1-3（低位面）、No.2-2（中位面）、沖積低地部ボーリング地点（益城町から提供）にて実施。
- ・動的変形試験：せん断剛性、減衰のひずみ依存特性の把握を目的に、ボーリング地点の地層区分を踏まえ、No.1-1（高位面）、No.1-3（低位面）、No.2-2（中位面）、沖積低地部ボーリング地点（益城町から提供）にて、地震時にひずみが生じると想定される Aso-4 層より上部の層を対象に実施
- ・液状化強度試験：液状化特性の把握を目的に、地下水位が高く物理試験の結果から液状化が想定される層が確認された、No.1-1、No.1-3、沖積低地部ボーリング地点（益城町から提供）を対象に実施。

◇物理探査

- ・速度構造の把握を目的に図 3-1、図 3-2 に示す測線にて実施。
- ・調査測線は、ボーリング調査位置に沿った配置、及び、物理探査の実施が可能な道路上を基本として活断層が想定される範囲を含んだ南北方向の測線を設定

◇常時微動計測

- ・地盤の固有周期を把握することを目的に図 3-3 に示す地点にて実施
- ・計測地点は益城町市街化区域内にて地形区分を目安にして、網羅的に配置

表 3-1 地質調査の項目及び数量表

分類	調査項目	単位	数量	備考
現位置	現地踏査(亀裂目視)	式	1	
	現地踏査(地形確認)	式	1	
	土質ボーリング	m	400	7 地点、Aso-3 層堀止め
	PS検層	m	170	3 地点
	標準貫入試験	回	400	7 地点
	サンプリング	本	11	
	高密度表面波探査	m	4,260	6 測線
	微動探査	地点	64	5 測線
	常時微動計測	地点	250	市街化区域全域
室内	物理試験 (土密,含水比,粒度,コンシステンシー)	試料	11	4 地点
	一軸圧縮強度試験	試料	8	4 地点
	動的変形試験	試料	11	4 地点
	液状化強度試験	試料	3	3 地点
その他	既往土質調査結果資料収集	式	1	産総研,益城町提供



写真 3-1 各現地調査の実施状況 (イメージ)

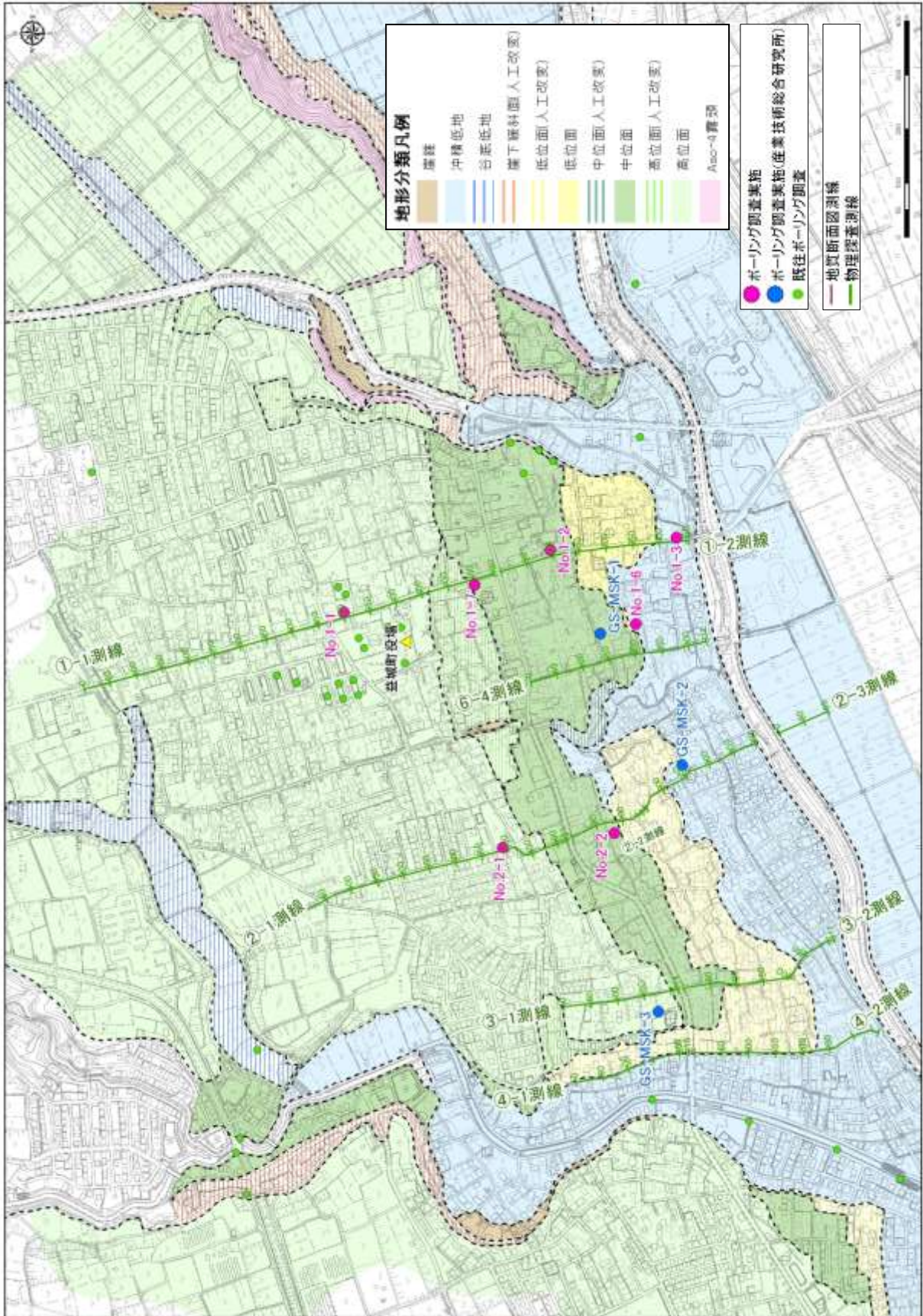


図 3-1 調査実施位置 土質ボーリング及び物理探査実施位置(鉄砂川の東側)

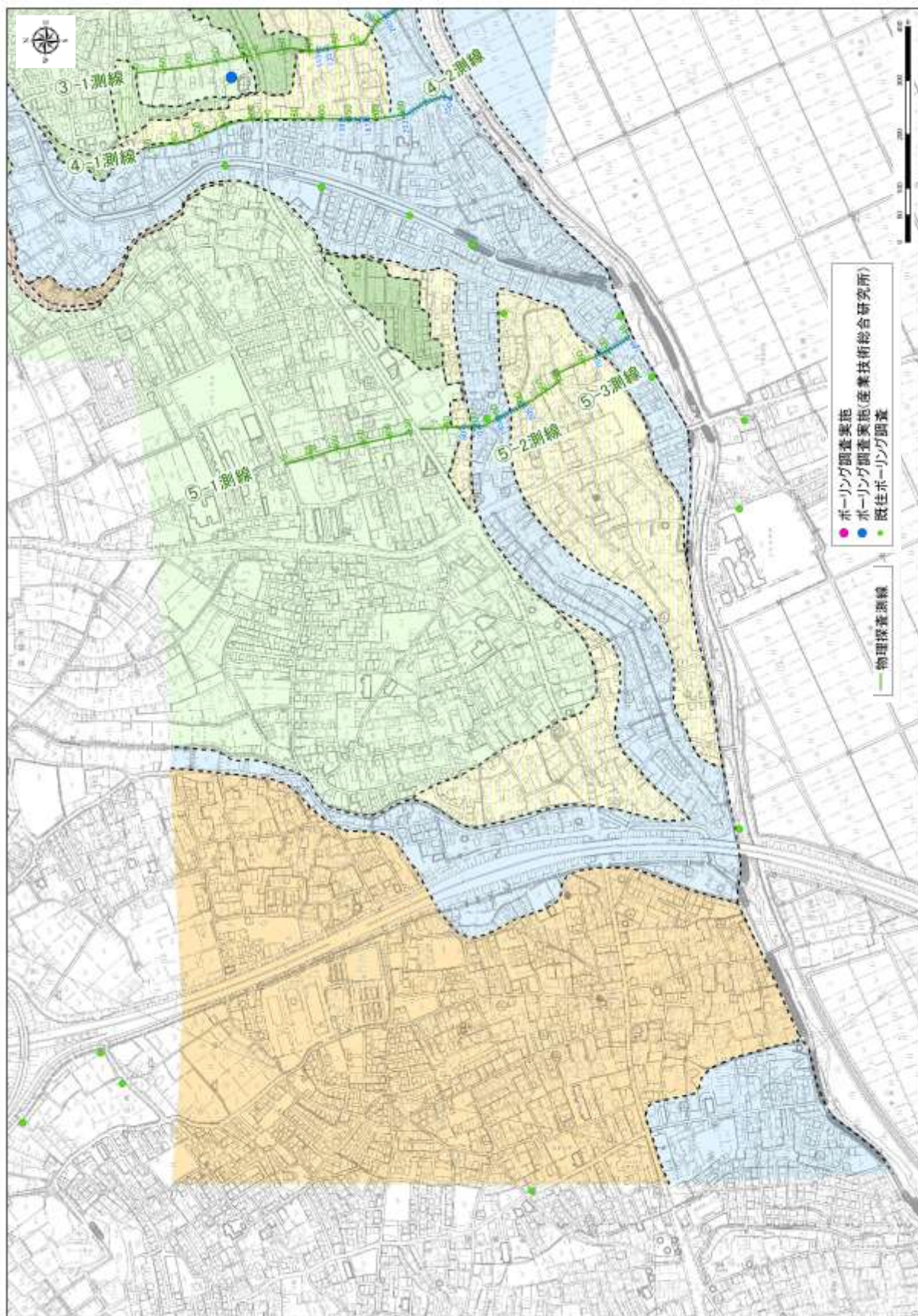


図 3-2 調査実施位置 土質ボーリング及び物理探査実施位置(鉄砂川の西側)

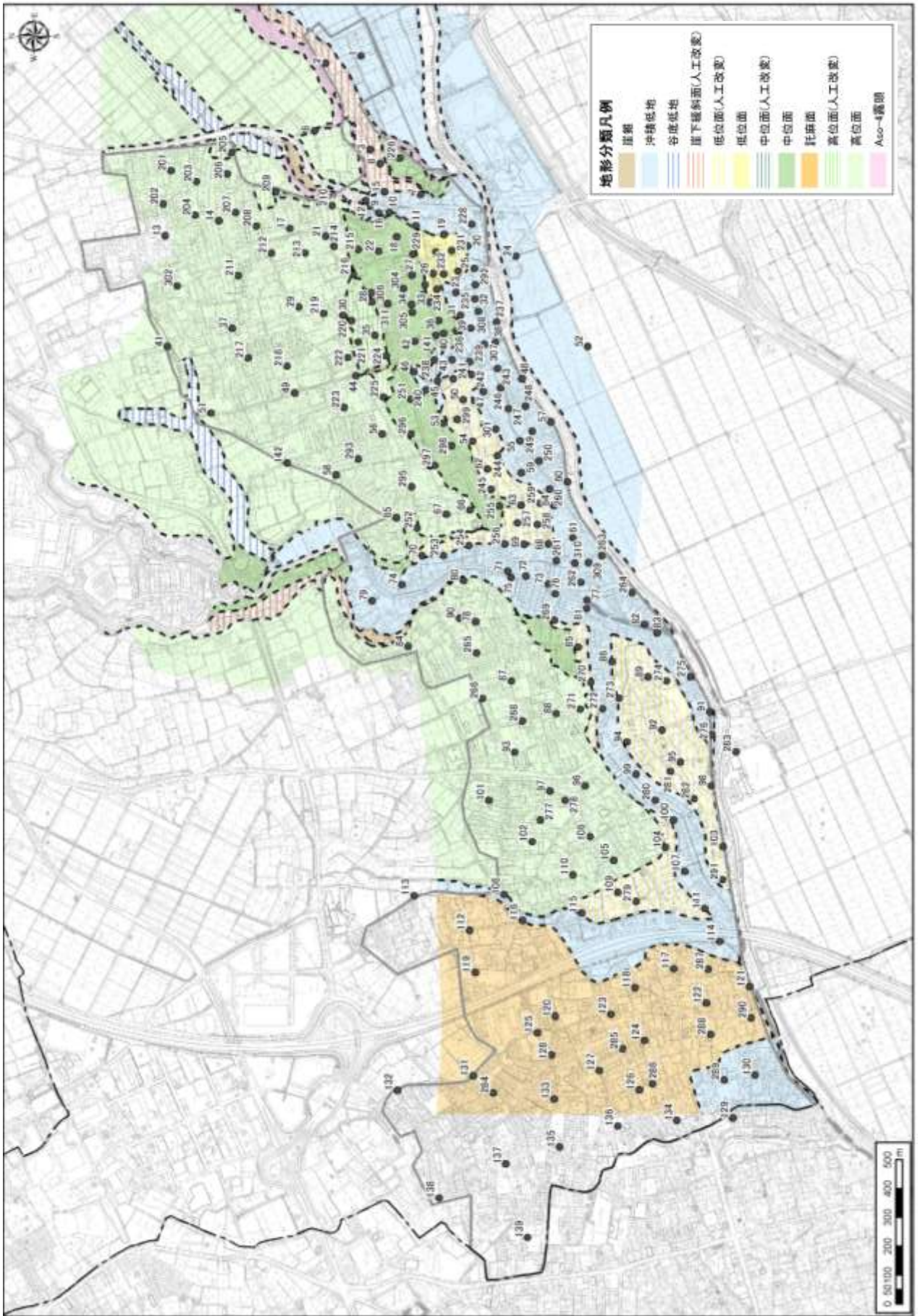


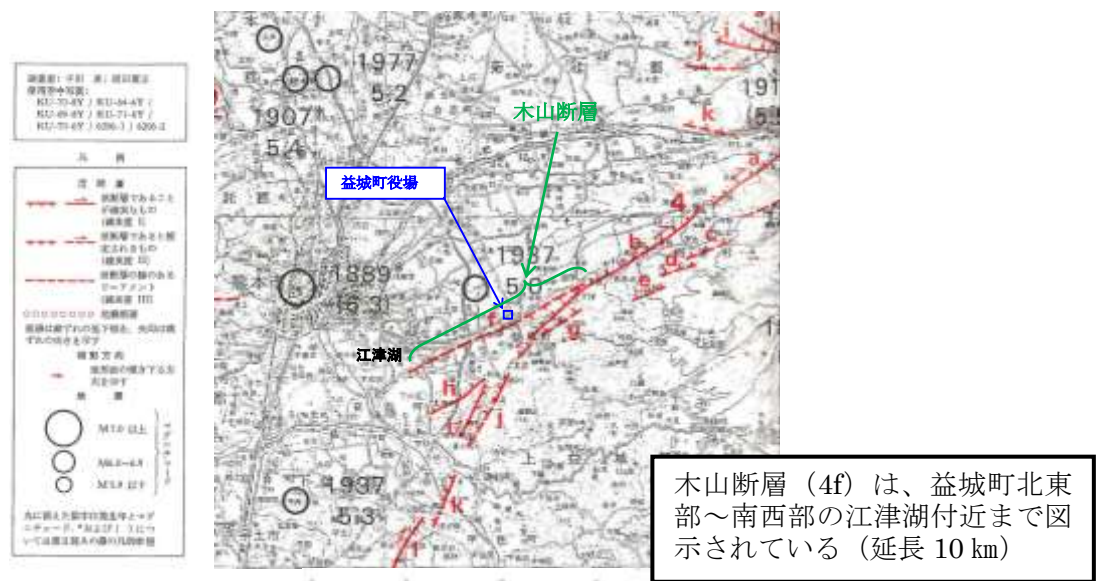
図 3-3 調査実施位置 常時微動計測位置

3.2. 活断層

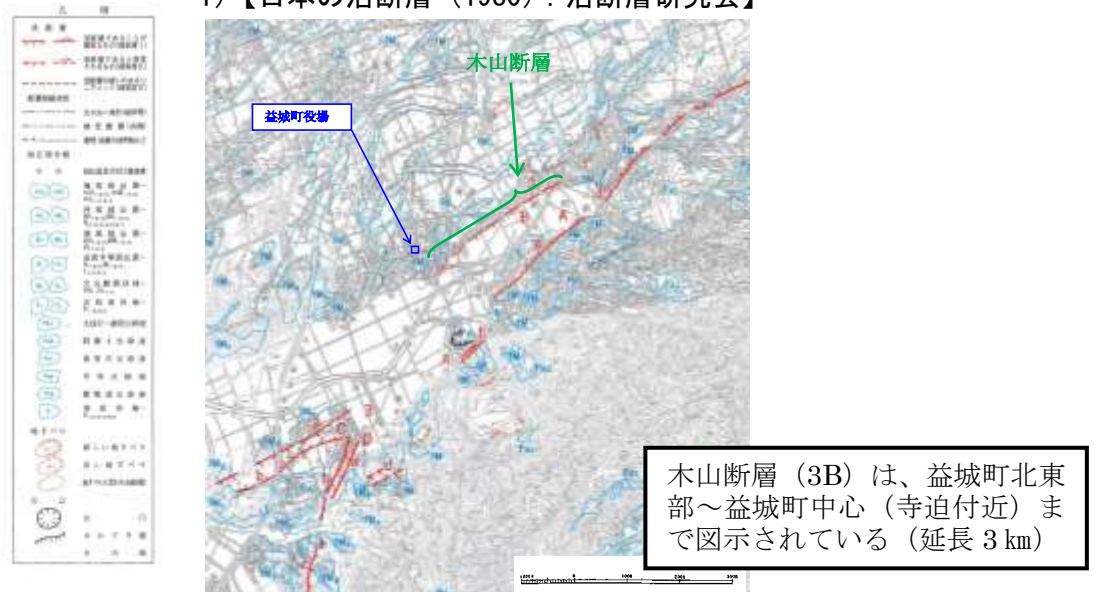
(1) 主要文献による益城町周辺の活断層分布

益城町付近に分布するとされている“木山断層”は、南側に位置する布田川断層系の一部として、主要な活断層文献により報告されている。この中で最新（2001年）の都市圏活断層図では、木山断層に相当する崖地形は、侵食崖という評価のため断層としては図示されていないが、それ以前の主要文献には延長等は異なるが木山断層の存在が推定されている。

- 1) 日本の活断層（1980）：木山断層は、益城町の北東部～南西部の江津湖付近まで報告されている（延長 10 km、確実度Ⅲ：活断層の疑いのあるリニアメント）
- 2) 九州の活構造（1989）：木山断層は、益城町北東部～益城町中心（寺迫付近）まで報告されている（延長 3 km、確実度Ⅱ：活断層であると推定されるもの）。南西端は、段丘面の南側を通過している。



1) 【日本の活断層（1980）：活断層研究会】



2) 【九州の活構造（1989：九州活構造研究会）】

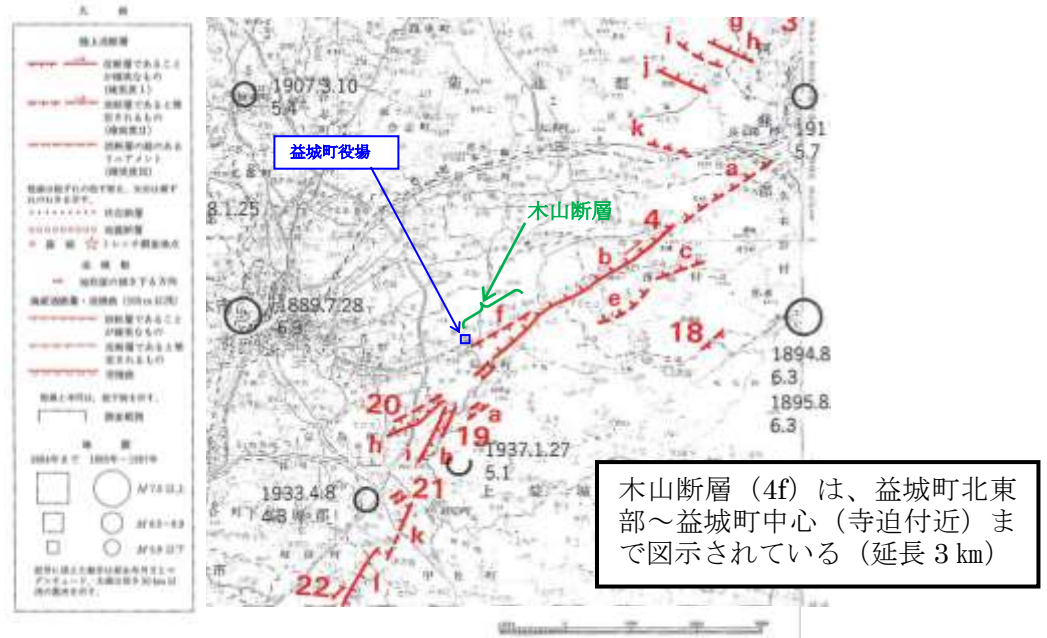
図 3-4 主要文献による木山断層の位置 (1)

出典：上図：日本の活断層、下図：九州の活構造

3) 新編日本の活断層 (1991) : 木山断層は、益城町北東部～益城町中心 (寺迫付近) まで報告されている (延長 : 3 km、確実度 II : 活断層であると推定されるもの)

※九州の活構造とほぼ同じ同位置に図示

4) 都市圏活断層図『熊本』(2004) : 木山断層に相当する断層は図示されていない。



3) 【新編日本の活断層 (1991 活断層研究会)】



4) 【都市圏活断層図『熊本』(2001 : 国土院)】

図 3-5 主要文献による木山断層の位置 (2)

出典 : 上図 : 新編日本の活断層、下図 : 都市圏活断層図

(2) 調査結果に基づく益城町周辺の活断層位置の推定とメカニズム

1) 活断層位置の推定方法

i) 測線上での活断層有無判定における推定方法

地表面の大きな亀裂の分布から大まかな断層線の位置を仮に想定し、想定される断層線と交差する位置で物理探査が可能な直線状の道路を測線として設定した。

測線上での活断層の有無については、以下の①～④を根拠として、総合的に判断した。

① 鍵層の標高差

活断層の推定根拠とするための地層のズレについては、分布標高からズレが認定しやすいように“地質の特徴から他の層と区別しやすい層”かつ“広域的に平坦～緩傾斜で分布している層”を鍵層とする。

調査地域では、以下の理由から Aso-4 直下の間隙層を活断層による地層のズレの指標となる主要な鍵層として用いるほか、Aso-4 上面^{※1)}についても同時期の堆積面を示す鍵層として用いることとする。

ア) Aso-4 直下の間隙層は、火山灰質の砂・シルトを主体とした堆積層であり、層相からその直上 (Aso-4) 及び直下 (Aso-3) の火砕流堆積物と明瞭に区別できる。また、阿蘇火砕流堆積物である Aso-4 の上面は、その直上に堆積する Aso-4 二次堆積物や被覆層と地質的特徴が異なり、区別が可能である。

イ) Aso-4 直下の間隙層は、比較的長期間にわたって水が関与して穏やかに堆積した堆積層 (緩傾斜の層理面が見られる) であり、緩傾斜～平坦に堆積していると考えられる。また Aso-4 上面も地形の凸凹を覆うように堆積した火砕流の上面であることから、概ね平坦～緩傾斜で分布している可能性が高い。

【鉄砂川の東側地域】・・・先行調査地域

鉄砂川の東側では、既往ボーリングの実施位置が益城町役場周辺の高位面に偏っていたため、地質構成に関する情報が不足していた。これを踏まえ、慎重を期して上記2つの鍵層候補のうちより深部に位置する Aso-4 直下の間隙層の分布を把握するため新規ボーリング調査を実施した。先行実施した断面 I 上のボーリング調査を終えた時点で Aso-4 上面の分布標高が平坦～緩傾斜であることが十分に確認できなかったため、Aso-4 上面は鍵層としては不十分と評価した (この付近では、Aso-4 堆積面が堆積後の侵食等で必ずしも連続的に保存されておらず、Aso-4 上面が平坦では無い可能性がある)。したがって、主要な鍵層とした Aso-4 直下の間隙層の分布標高を確認し鍵層とした。

これより、鉄砂川の東側地域では、鍵層となる Aso-4 直下の間隙層に急な標高差がある場合は調査地点間に活断層の存在を推定する一根拠とした。

なお、ボーリング調査の結果から、断面 I 以外の 2 断面 (断面 II、III) においては、Aso-4 上面の分布標高がほぼ平坦～緩傾斜であることが確認できたことから、Aso-4 上面を鍵層として、この層に急な標高差が確認された場合も一定程度的評価は可能と評価した。

※1) Aso-4 上面は厳密には“面”であり“層”ではないが、本報告書では東側地域との対比から便宜的に、“鍵層”と表現する。

※2) 火砕流の堆積面は粘性が低いいため堆積面の傾斜が緩くなるとされている。

【鉄砂川の西側地域】

鉄砂川の西側においては、発災以前に数多くのボーリング調査（深度はやや浅いが Aso-4 上面を確認することは可能）が面的に行われている。このボーリングデータから、限定された範囲（図 3-6 の赤破線より東側）において、Aso-4 上面が図 3-6 のコンター図に示すように、大局的には南側の沖積低地に向かって概ね緩やかに傾斜して分布していることが確認された（この付近では Aso-4 上面は堆積面として保存されている）。

東側の先行調査結果より、Aso-4 上面も Aso-4 直下の間隙層とほぼ同等に鍵層として有効であることが確認されていること、町の計画に活用するため限られた時間での調査であることから、鉄砂川の西側地域については、Aso-4 上面を鍵層として、Aso-4 上面に急な標高差がある場合は調査地点間に活断層の存在を推定する一根拠とした^{※3}。

ただし、より詳細な評価を行うためには、Aso-4 上面だけでなく深部までのボーリングを実施し、Aso-4 直下の間隙層までを確認し、鍵層として評価することが有効である。

※3) 妙見川の東側付近（図 3-6 の赤破線付近）を境に、東側には高位面（益城台地の最上位を形成する幅広い平坦面）が分布するが、西側には高位面と異なる託麻面が分布し、託麻礫層が南北方向に Aso-4 の削り込む形で分布している箇所がある。したがって、妙見川の西側では Aso-4 上面は鍵層とできない（堆積面として保存されていない可能性が高い）と判断し、妙見川の東側を評価対象とした。

表 3-2 益城町付近の鍵層の評価結果

	地形的特徴	分布地質の特徴	活断層判定の鍵層
調査地域全般	鉄砂川を境にして、東側と西側で地形面の分布が異なる。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 妙見川より東側では、上位（新しいもの）から、クロボク土→アカボク土→Aso-4 二次堆積物→Aso-4^{※1}→Aso-4 直下の間隙層→Aso-3^{※1}が順に堆積。 ・ 妙見川付近より西側では、被覆層（クロボク・アカボク）の下部に託麻礫層が分布。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上下との地層の差異が明瞭であり、平坦～緩傾斜で堆積が推定される面または層を鍵層とし、<u>鍵層に急な標高差がある場合には調査地点間に活断層の存在を推定する一根拠とする。</u>
鉄砂川の東側地域	<ul style="list-style-type: none"> ・ 秋津川にはほぼ平行する形で北から南に向けて、高位面、中位面、低位面（一部人工改変を含む）沖積面が階段状に分布する。 ・ 大局的に緩やかな南傾斜の地形を呈している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大局的に調査地域全般に分布する地質構成が確認されるが、Aso-4 上面の分布を確認できるボーリングは限られている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既往ボーリングの実施箇所に偏りがあったため^{※2}、主要な鍵層とした Aso-4 直下の間隙層までを確認する新規ボーリングを実施した。 ⇒<u>Aso-4 直下の間隙層の分布標高を確認し、鍵層とした。</u>
鉄砂川の西側地域	<ul style="list-style-type: none"> 鉄砂川の東側と異なり、以下の特徴を有する。 ・ 鉄砂川と妙見川の間では高位面と低位面がほぼ接する形で分布する。 ・ 高位面と低位面の間に秋津川の旧河道が位置しており、地形が複雑である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 妙見川の東側付近までは、上位（新しいもの）から、クロボク土・アカボク土（不明瞭）→Aso-4 二次堆積物→Aso-4 が順に堆積 ・ 妙見川の東側付近より西側では、Aso-4 分布標高付近に託麻礫層が分布する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 妙見川の東側では、発災前の既往ボーリングから Aso-4 上面の標高を面的に把握することができ、大局的には南側に向かって平坦～緩やかに傾斜して分布していることが確認できた。 ⇒<u>既往ボーリングによる Aso-4 上面を鍵層として評価した。</u>

※1：Aso-4、Aso-3 は火砕流堆積物

※2：鉄砂川の東側地域では、既往ボーリングの実施位置が益城町役場周辺（高位面）に集中している

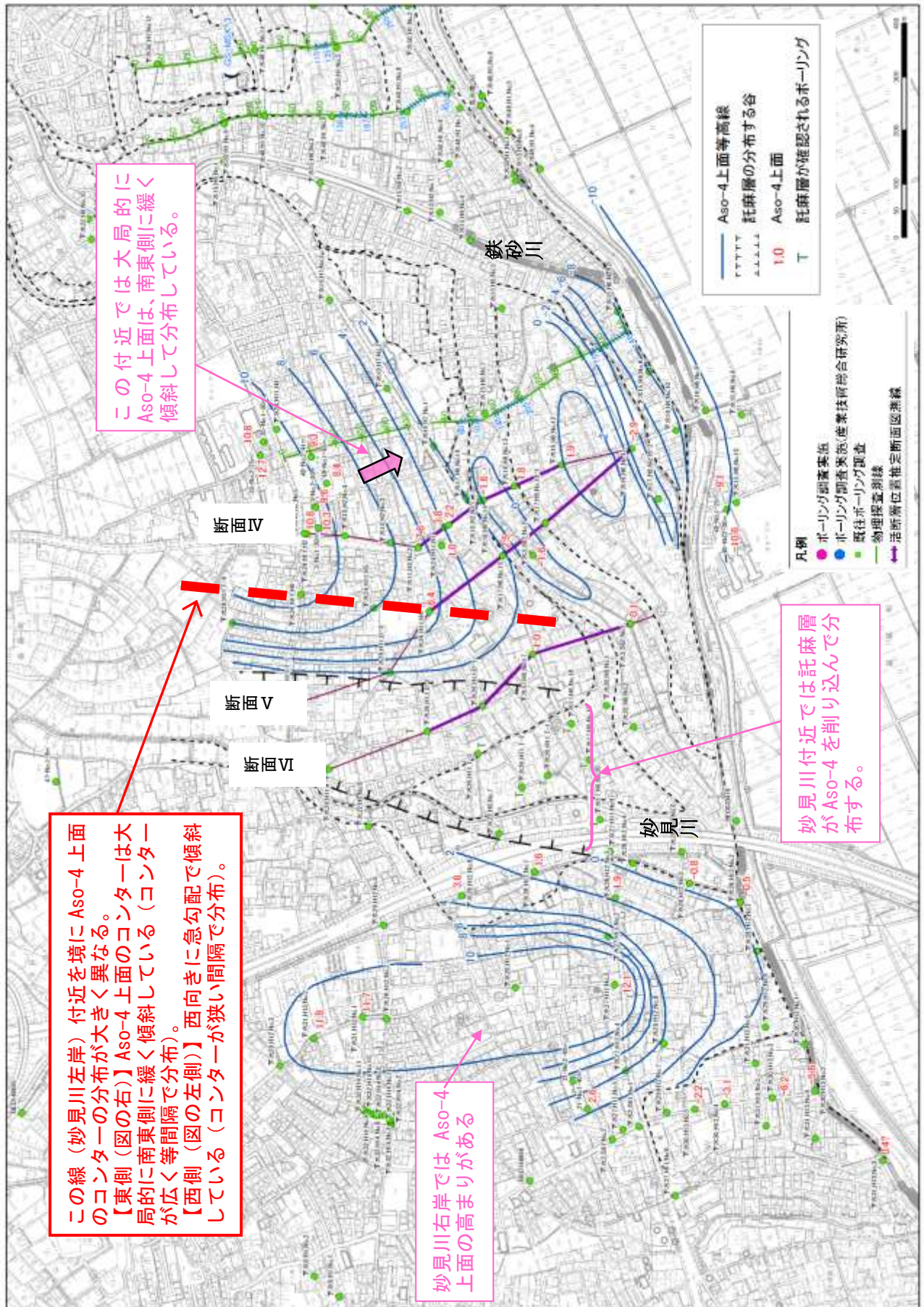


図 3-6 既往ボーリングデータによる Aso-4 上面コンター図

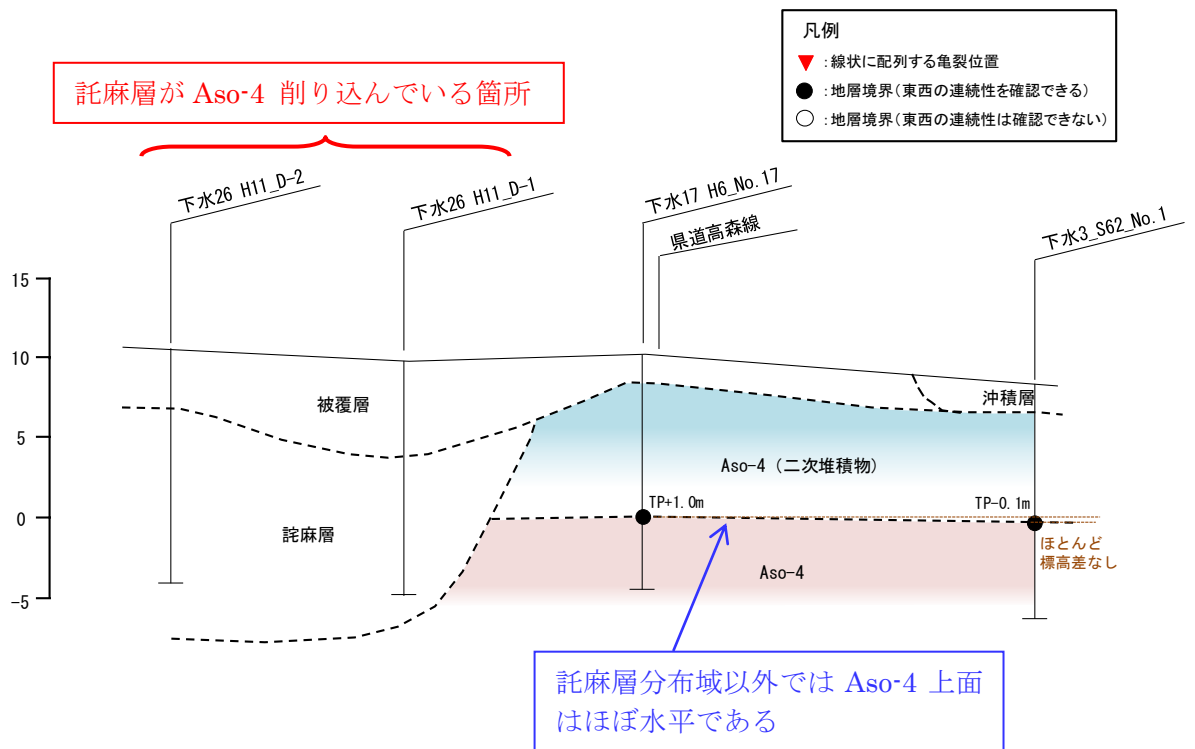


図 3-7 西側地域の託麻層による削り込み断面図（VI断面：断面位置は図 3-6 参照）

② 明瞭な段差地形の有無

一般に、活断層が繰り返し活動することに伴い、断層崖等の明瞭な段差地形が現れることから、このような地形の有無に着目して、活断層の存在を推定する一根拠とする。

③ 低速度帯 ($V_s \leq 160\text{m/s}$) の有無

活断層が繰り返し活動することに伴い、本来硬かった地盤が柔らかくなる現象が生じる（柔らかくなった部分をダメージゾーンという）。この柔らかい部分は周辺地盤と比較して S 波速度が低下すると考えられるため、表面波探査等の S 波速度が 160m/s 以下の低速度帯の存在が推測される部分を活断層の存在を推定する一根拠とする。

ただし、低速度帯は軟弱地盤である可能性も考えられることから、地形状況を踏まえて判断する。

④ 地表に現れる連続的な亀裂の有無

地表に生じる連続的な亀裂は、ズレの有無、亀裂の方向性、ズレの要因などを考慮して、活断層の存在を推定する一根拠とする。

ii) 測線間での活断層線の推定方法

前記により測線上で推定した活断層位置に基づき、測線間を結ぶ活断層線の位置を以下により推定した。

・顕著なズレを伴い連続的に繋がる亀裂の存在

今回の地震では、右横ズレおよび右横ズレを伴う南落ちのズレ（正断層成分）が、断層要因によるズレと推定されるため（南落ちだけのズレの場合は、震動に伴う重力性のズレの可能性もあるが、横ズレが伴う亀裂は断層要因の可能性が極めて高い）、これらのズレを伴う亀裂が連続的に繋がることをもって断層線の位置を推定する。

・連続的かつ明瞭な段差地形の存在

断層崖等と考えられる明瞭な段差地形が連続することをもって断層線の位置を推定する。

2) 活断層位置の推定結果

前記の方法に従い、活断層位置の推定を行った結果、表 3-3 及び図 3-19、図 3-20 に示すとおり、鉄砂川の東側では、3本の活断層（A、B、C）を推定した。鉄砂川の西側では、東側で推定した3本の活断層のうち、亀裂の分布位置から活断層Aと活断層Cが連続し、活断層Cが活断層Aに収れんする形で分布すると推定した（東側で最もズレ量の大きい活断層Aが西側に連続する可能性が高いと評価）。活断層Bは、鉄砂川周辺の沖積層ではその延長箇所に亀裂等が確認されず西側延長は不明であることから、図では推定根拠のある部分として鉄砂川沿いの沖積層の東側までと表記しているが、鉄砂川西側の活断層Aまたは活断層Cに連続する可能性もある。

これらの活断層は、図 3-4 に示した木山断層の一部に相当すると考えられ、南側の布田川断層と連動して活動し、木山－嘉島地溝帯を形成していると推定される。

活断層A～Cは、益城町の西側ほど地表面でのズレ量が小さくなる傾向があり、最大ズレ量を示すのはいずれも鉄砂川の東側である。鉄砂川の東側で、活断層Aにおいて横ズレ、上下変位ともにズレ量 10 cm程度以上の亀裂が確認できるのは、断層線から幅 20m 程度以内の範囲である。

（ピット調査による亀裂調査結果）

活断層の存在を確認するため、上記活断層Aの推定位置の近傍で、地表に出現した比較的連続した亀裂のある箇所でピットを掘削し、地下の亀裂の連続状況を確認した。調査位置は、図 3-13 断面Ⅲと図 3-19 活断層位置推定平面図（東側地域）に示すとおりである。

ピット東壁面において、地表の2本の亀裂は、地下の陥没した土層構造を挟む2本の断層につながっていることが確認された。また陥没部を構成する土層の形成年代やその堆積状況及び断層面近傍の土層の変形の状況から、過去1万数千年～1万年前の時期に2回程度の活動履歴があると推定された。ピットの西壁面において対応する土層が確認できていないため、正確なズレの大きさは不明である。（横ズレによって対応する部分と分離している可能性があると考えられる。）

地表亀裂との連続性や、同じ断層面を使って活動したとみられることから、活断層Aの活動を反映する地表付近の動きを示す活断層と評価される。本ピット調査結果の詳細については、参考資料に記す。

表 3-3 益城町付近の活断層調査結果一覧

断層名	エリア	市街地での地表面の亀裂、ズレ	物理探査による低速度帯	過去の地震活動に伴う地層の標高差	調査結果の評価
活断層 A	鉄砂川より東側	<ul style="list-style-type: none"> 最大 35cm の右ズレと最大 15 cm 程度の南落ちのズレ^{※1}を伴う。 一部断続的であるが、ほぼ線状に連続。 一部が南落ちの低崖地形に一致。 ズレが 10 cm 以上の亀裂が現れるのは断層から幅 20m 程度以内。 	<ul style="list-style-type: none"> 幅の広い低速度帯と位置が明瞭に対応。 対応する低速度帯は深部にまで確認される。 	<ul style="list-style-type: none"> Aso-4 より前の基盤層の標高差は 8~10m 程度。 Aso-4 上面の標高差は断面Ⅱ,Ⅲで 5m 程度。 断面Ⅰでは Aso-4 上面が不明瞭。 Aso-4 前の基盤層上面のズレ量が Aso-4 上面のズレ量より大きいことから、活動の累積性が推定される。 	幅広い低速度帯とほぼ一致していること、下位層と上位層で変位の累積性が推定されることなどから、複数回の断層変位によるダメージゾーンが形成されていると推定され、活断層と評価。
	鉄砂川より西側	<ul style="list-style-type: none"> 断層の連続方向に近い東北東-西南西方向の右ズレ変位を伴う割れ目が雁行状に分布 右ズレは最大 5 cm 程度、大半は 2~3 cm 以下。 上下方向のズレは 2~3 cm 以下で、確認箇所も少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 西側地域では 1 測線のみであるが、⑤測線で低速度帯と位置が一致する。 	<ul style="list-style-type: none"> Aso-4 上面の標高差は断面Ⅴで 4.1m、断面Ⅳでは、やや不明瞭であるが、3.8m。 最も西側の断面Ⅵでは、Aso-4 上面の標高差は確認されない。 	<p>地表のズレ、低速度帯、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。</p> <p>ただし、断面Ⅴ付近より東側では、地表の亀裂が小さいことから今回の活動は限定的と推定される。</p> <p>断面Ⅴ付近より西側は、地表に変位を伴う亀裂が確認される箇所までを活断層と推定。</p>
活断層 B	鉄砂川より東側	<ul style="list-style-type: none"> 市街地の西側では 14 cm が 1 箇所、他箇所は 5cm 程度の右ズレと同程度以下の南落ちのズレを伴う。 亀裂は断続的に分布。 市街地の東側では亀裂は確認できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面Ⅱで低速度帯と位置が一致。 断面Ⅰでは低速度帯との対応は不明瞭。 	<ul style="list-style-type: none"> Aso-4 より前の基盤上面の標高差は断面Ⅰで 17m 程度（活断層 A、C に比べて大きい）。 断面Ⅱでは活断層 B、C 合わせて 15m 程度 Aso-4 以降の標高差は不明瞭。 Aso-4 堆積前のズレ量より Aso-4 上面のズレ量が小さいことから、活動の累積性が推定される。 	<p>地表のズレ、一部低速度帯、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。</p> <p>ただし、推定される断層線の東側では地表に亀裂が生じていないことから今回の活動は限定的であると推定。</p>
	鉄砂川より西側	—	—	—	鉄砂川沿いの沖積層分布域より西側へ連続性は根拠に乏しく、活断層 A または C に連続するかは不明（鉄砂川周辺の沖積層より西側では、沖積層上では亀裂が確認できないことから沖積層の東側までとして図示）。
活断層 C	鉄砂川より東側	<ul style="list-style-type: none"> 西側では数 cm 程度以下の右ズレと同程度の南落ちのズレを伴う。 亀裂は断続的に分布。 市街地の東側では亀裂は確認できないが、低崖地形に一部一致する。 	<ul style="list-style-type: none"> 全体に低速度帯との位置の対応は、不明瞭。 	<ul style="list-style-type: none"> Aso-4 より以前の基盤上面の標高差は断面Ⅰで 5.5m、断面Ⅱで活断層 B、C 合わせて 15m 程度。 Aso-4 上面の標高差は不明瞭。 	<p>地表のズレ、地層の標高差の位置がほぼ一致することから活断層と評価。</p> <p>ただし、低速度帯との位置の対応は不明瞭であることから、明瞭なダメージゾーンが形成されていないこと、鍵層の標高差が活断層 A、B に比べ小さいことから今回の活動は限定的と推定。</p>
	鉄砂川より西側	<ul style="list-style-type: none"> 東北東-西南西方向の右ズレ変位を伴う割れ目が雁行状に分布 右ズレは最大 5 cm 程度、大半は 2~3 cm 以下 	<ul style="list-style-type: none"> 低速度帯との位置の対応は不明瞭 	<ul style="list-style-type: none"> 鍵層の標高差は確認していない。 	断面Ⅳ付近より西側では、推定される活断層は 1 本になることから、この付近から活断層 A に収れんすると推定。

※1 活断層 A における南落ちの最大値は 20cm 程度のもので 1 地点で確認されているが、当該箇所は建物近傍かつ局所的なもので地表地震断層である可能性は低い。他箇所では最大 15cm 程度の南落ち変位が確認されている。

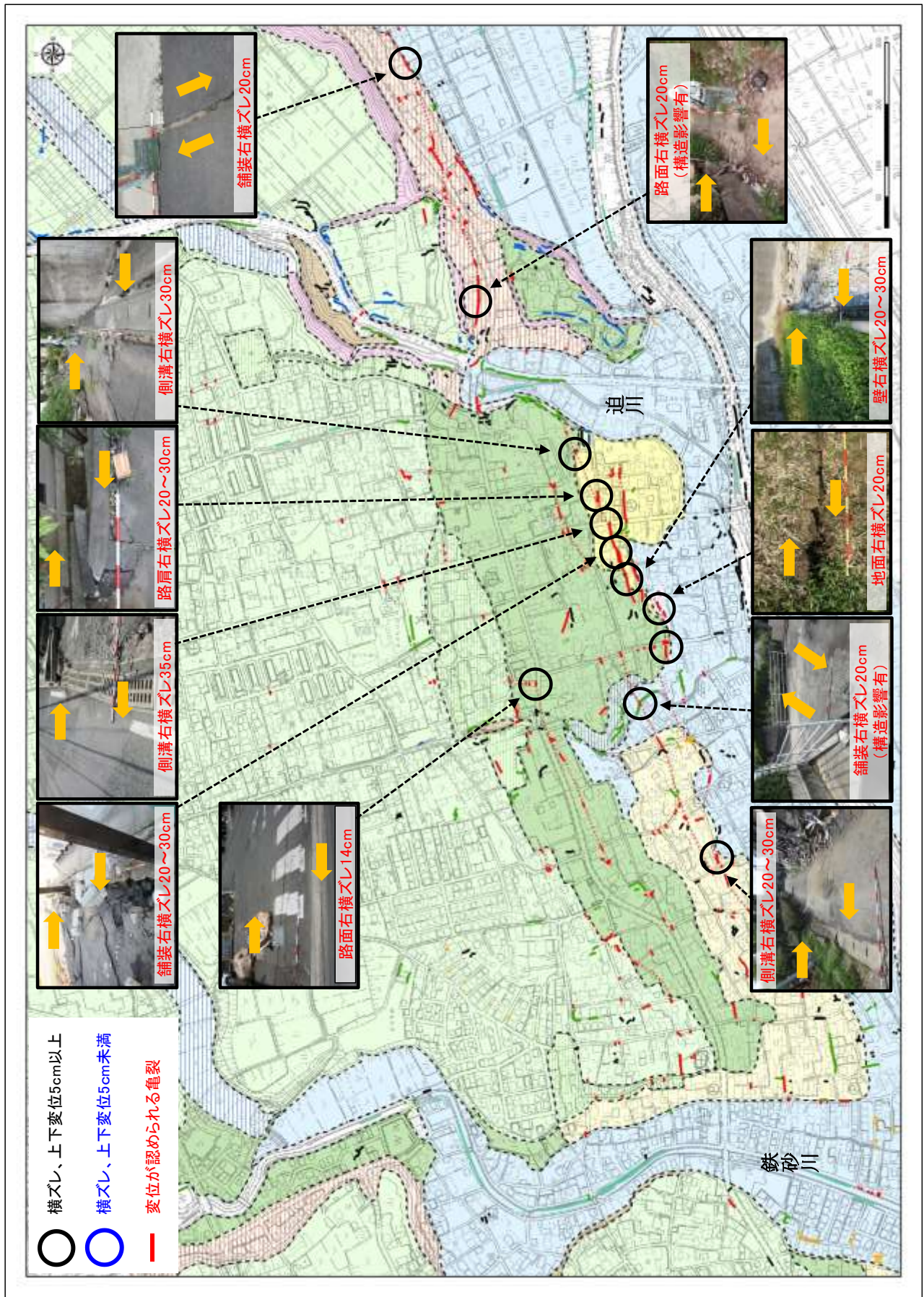


図 3-8 益城町市街地内における亀裂（横ズレ）位置図（東側地域）

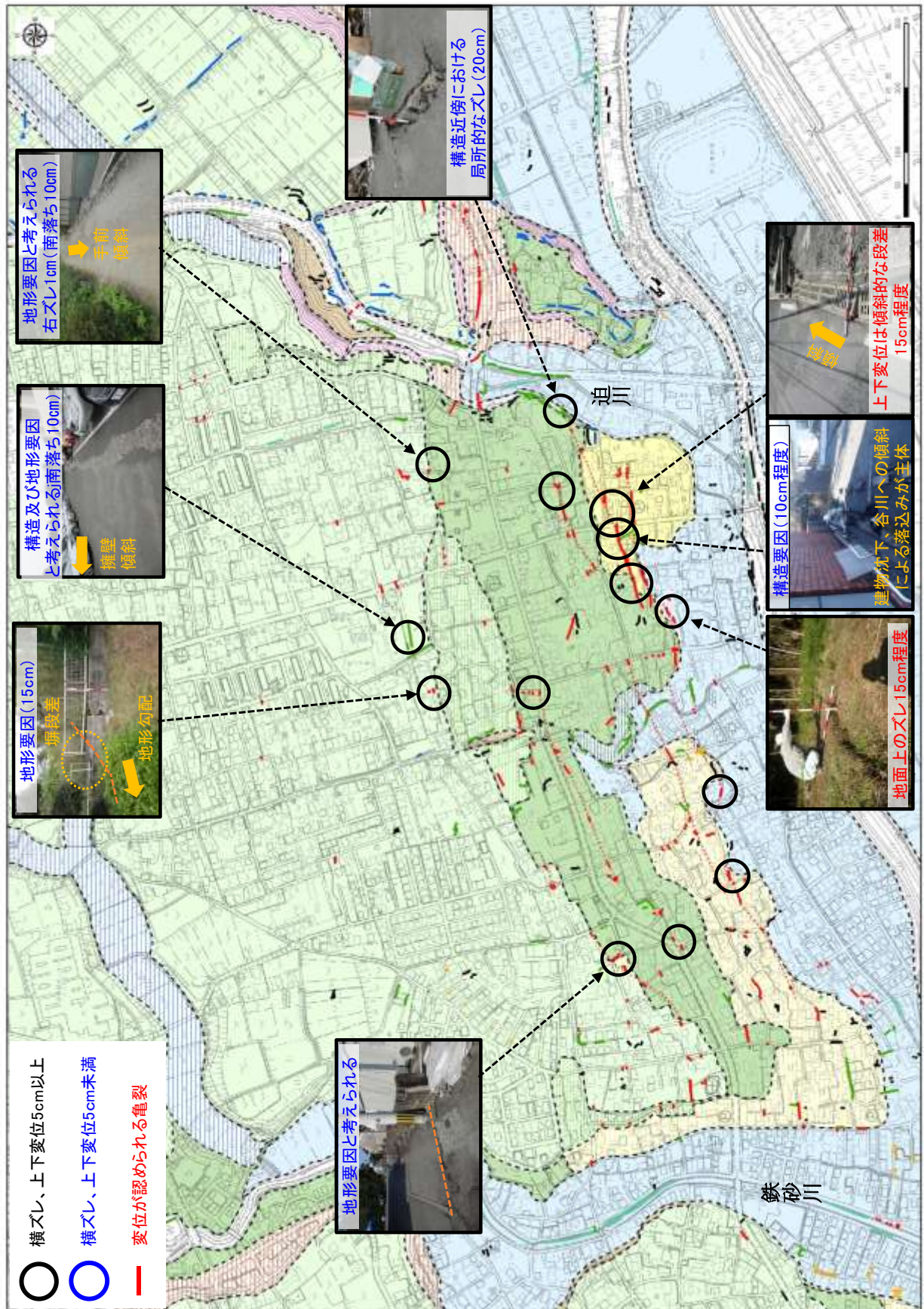


図 3-9 益城町市街地内における亀裂（縦ズレ）位置図（東側地域）

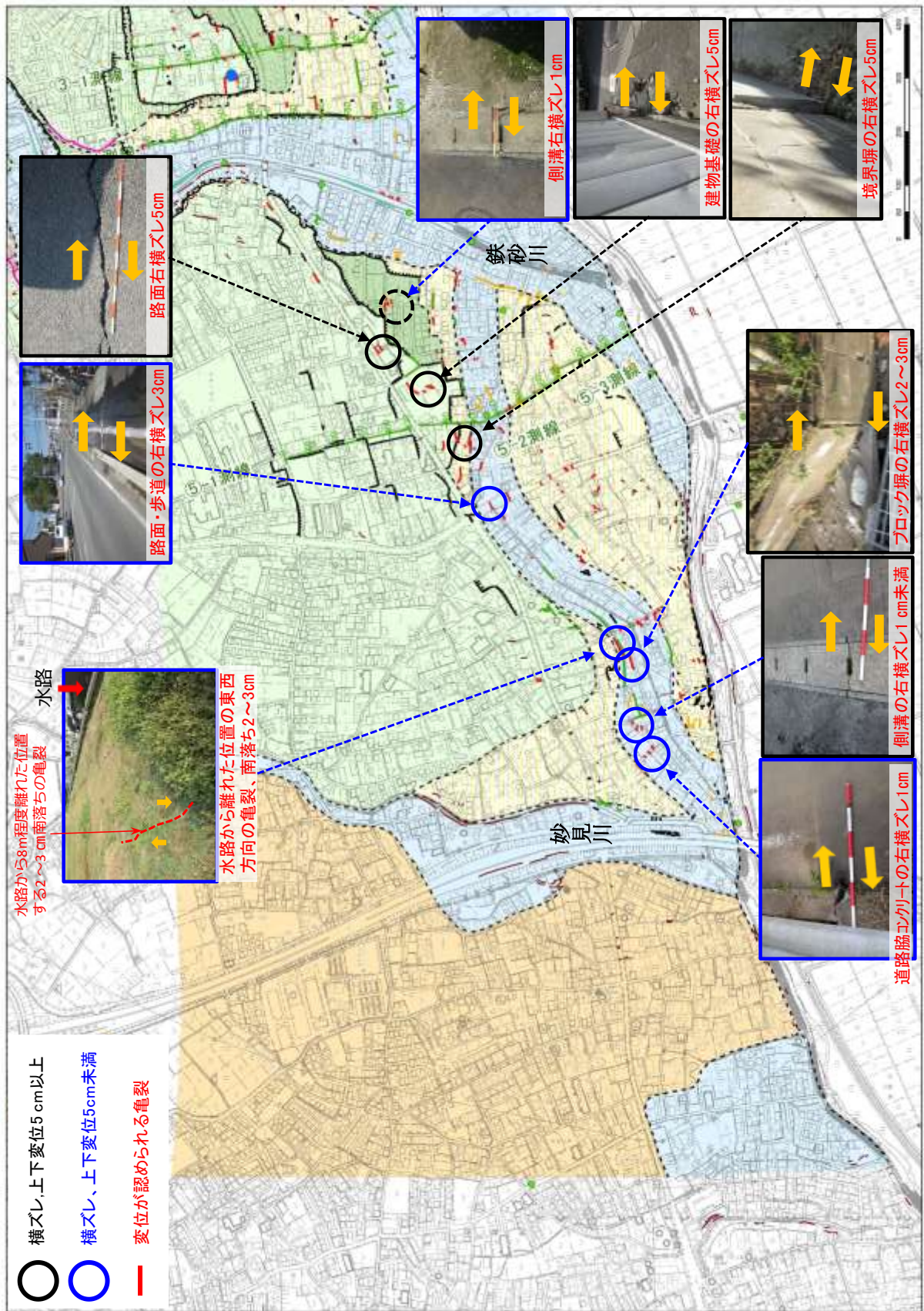


図 3-10 益城町市街地内における亀裂（横・縦ズレ）位置図（西側地域）

活断層 A の推定根拠 (断面 I、II)

- ・ Aso-4 直下の間隙層の標高差
- ・ 明瞭な段差地形と連続的な亀裂の存在
- ・ 断層位置が低速度帯と一致

活断層 B、C の推定根拠 (断面 I、II)

- ・ Aso-4 直下の間隙層の標高差
- ・ 連続的な亀裂 (断面 II のみ)
- ・ 活断層 C は低速度帯は明瞭には認められないが、低崖地形は認められる

凡例

- ▼ : 線状に配列する亀裂位置
- ▨ : 低速度帯
- : 地層境界 (東西の連続性を確認できる)
- : 地層境界 (東西の連続性は確認できない)

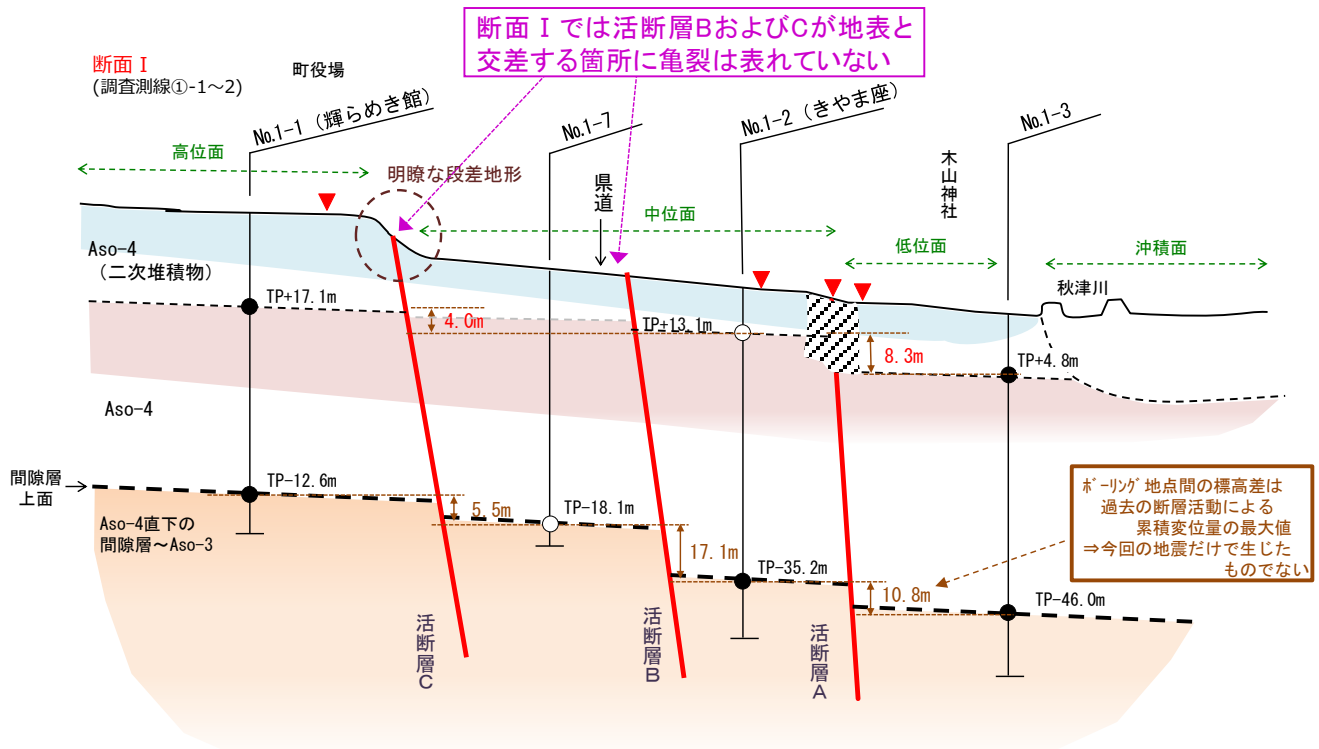


図 3-11 益城市市街地内における活断層位置推定断面図 1 (断面 I)

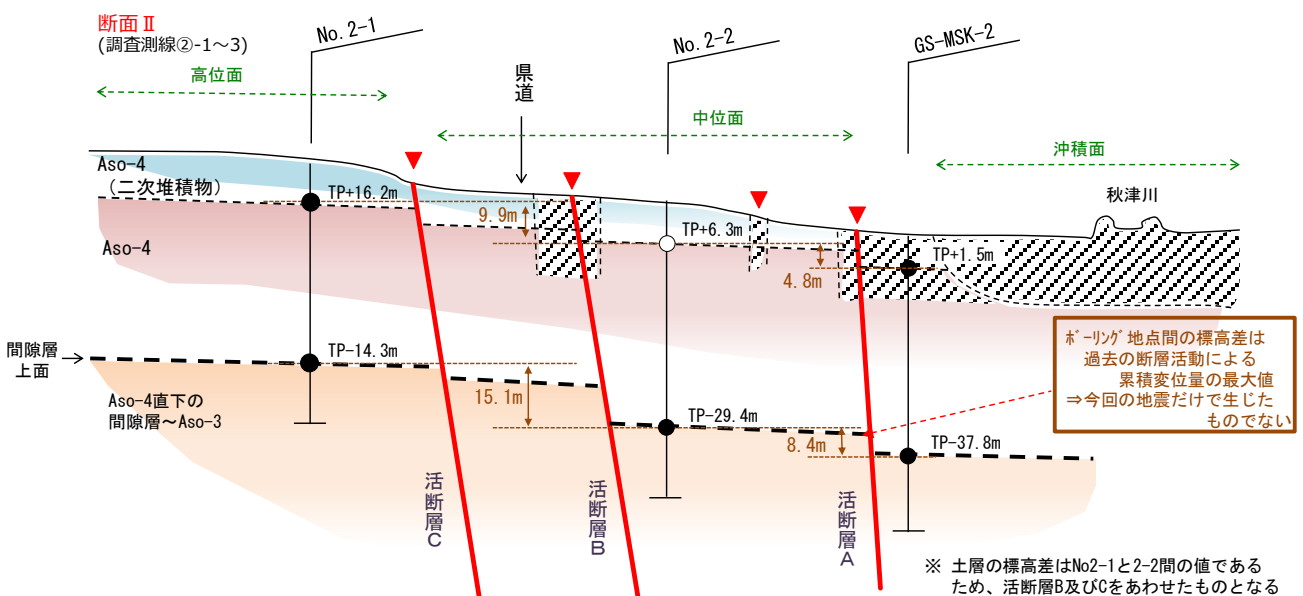


図 3-12 益城市市街地内における活断層位置推定断面図 2 (断面 II)

活断層 A の推定根拠 (断面Ⅲ)

- ・ Aso-4 直下の間隙層および Aso-4 上面の標高差
- ・ 明瞭な段差地形と連続的な亀裂

凡例

- ▼ : 線状に配列する亀裂位置
- : 地層境界(東西の連続性を確認できる)
- : 地層境界(東西の連続性は確認できない)

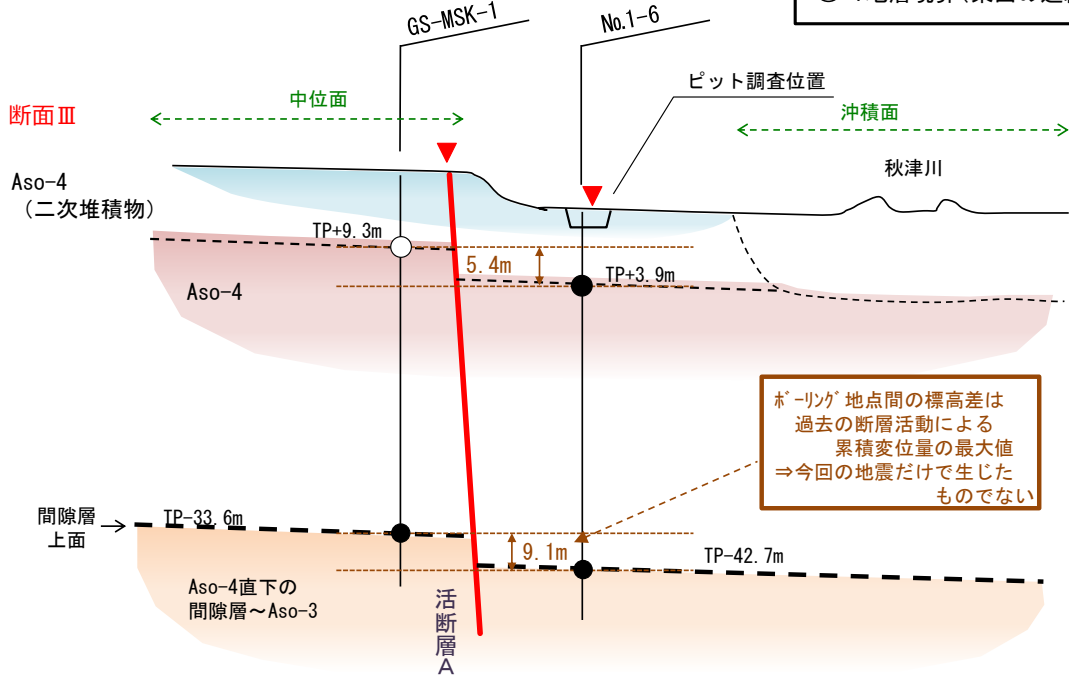


図 3-13 益城町市街地内における活断層位置推定断面図 3 (断面Ⅲ)

西側活断層の推定根拠 (断面Ⅳ)

- ・ Aso-4 上面の標高差
- ・ 地表に連続的な亀裂

凡例

- ▼ : 線状に配列する亀裂を確認できた地点
- ▨ : 低速度帯(投影)
- : 地層境界(東西の連続性を確認できる)
- : 地層境界(東西の連続性は確認できない)

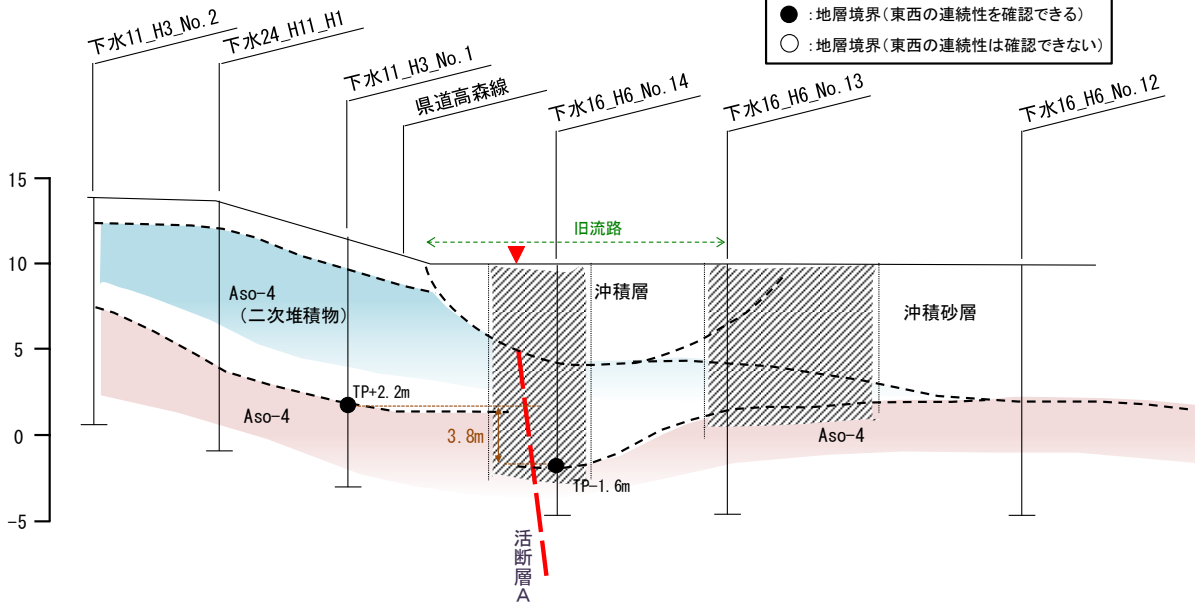


図 3-14 益城町市街地内における活断層位置推定断面図 4 (断面Ⅳ)

西側活断層の推定根拠（断面V）
 ・Aso-4 上面の明瞭な標高差

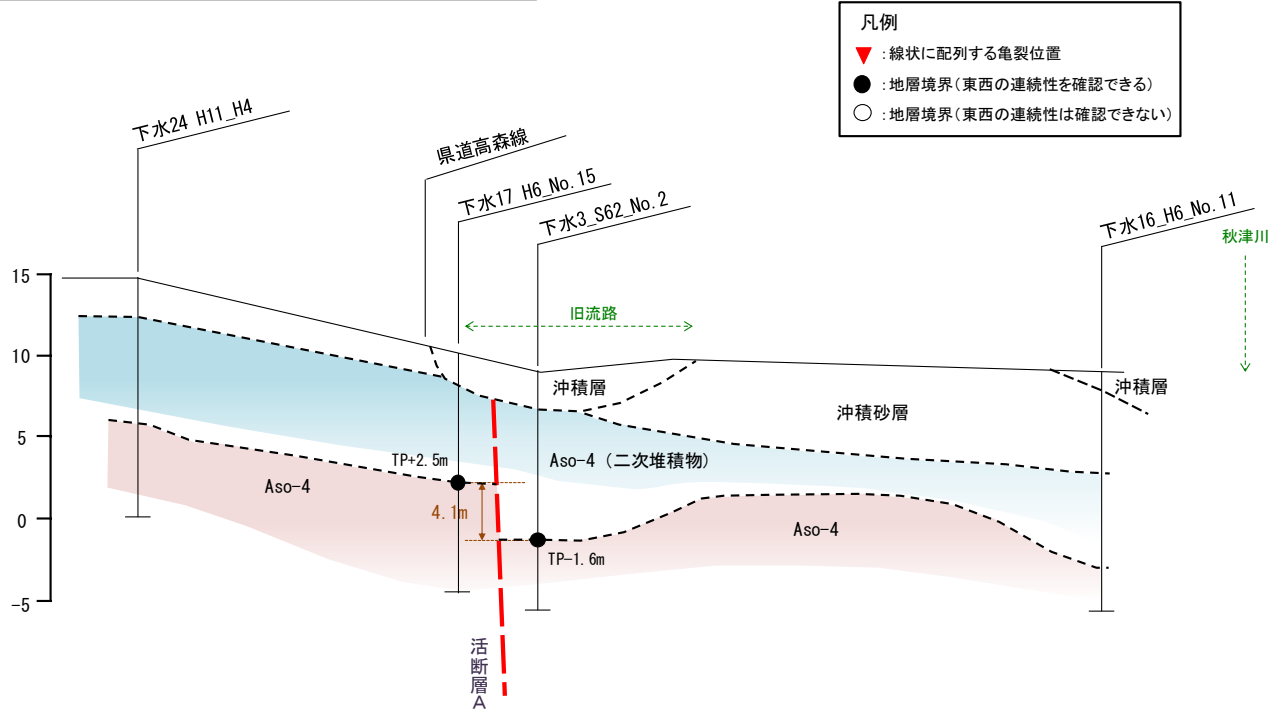


図 3-15 益城町市街地内における活断層位置推定断面図 5（断面V）

西側活断層の推定根拠（断面VI）
 ・Aso-4 上面の明瞭な標高差は認められない。
 ・亀裂の分布から断層を推定

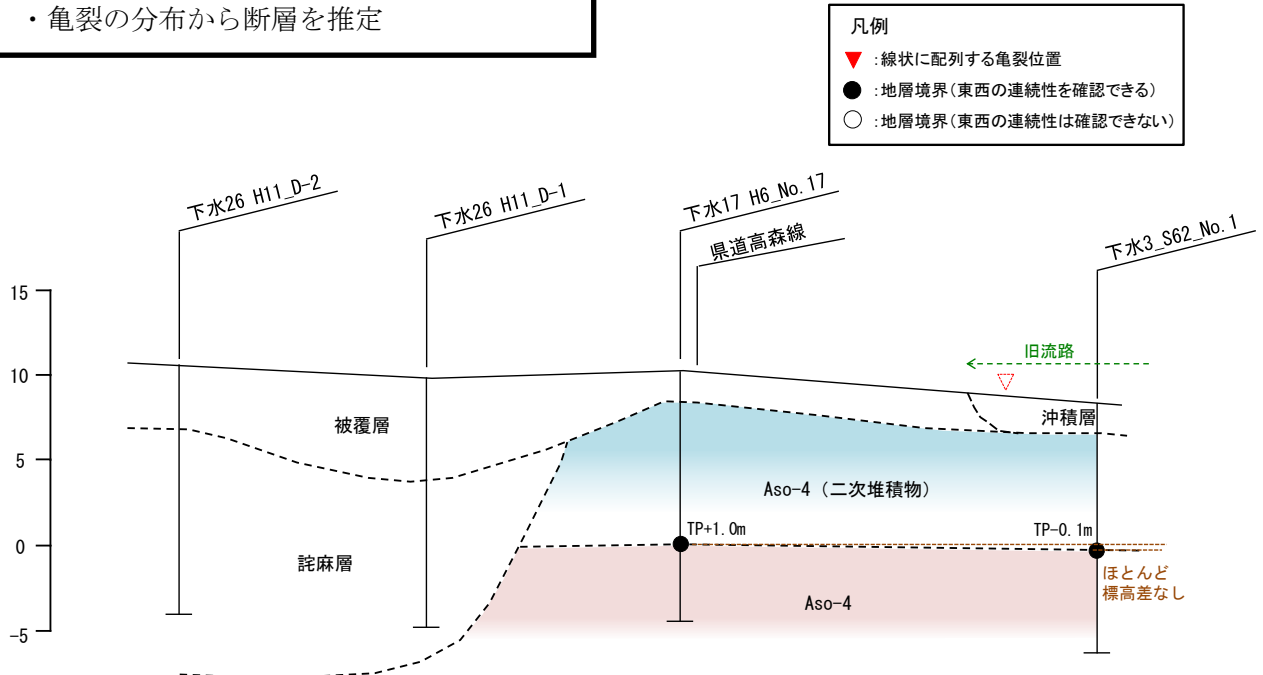


図 3-16 益城町市街地内における活断層位置推定断面図 6（断面VI）

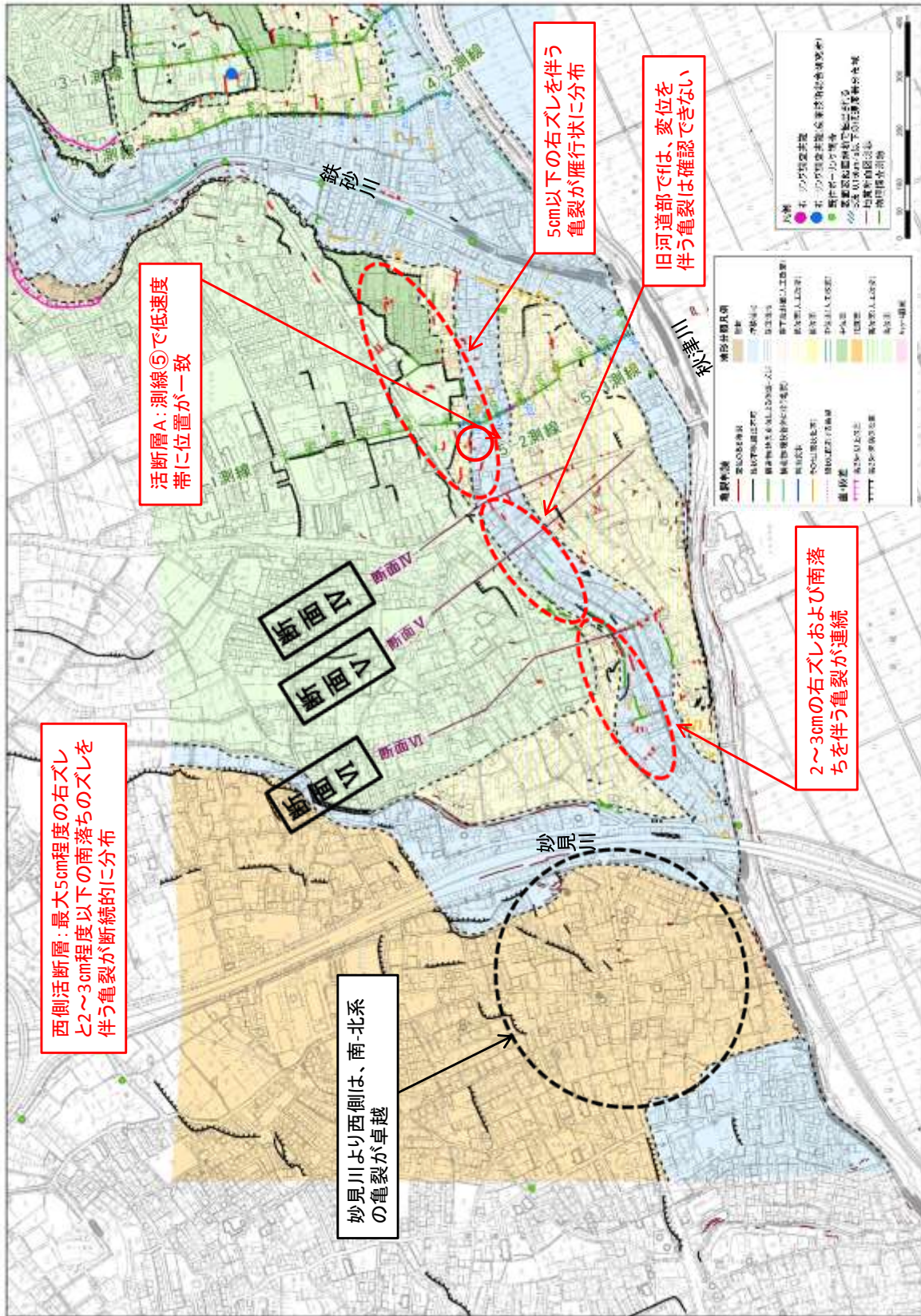


図 3-18 益城町市街地内における活断層調査結果平面図（西側地域）

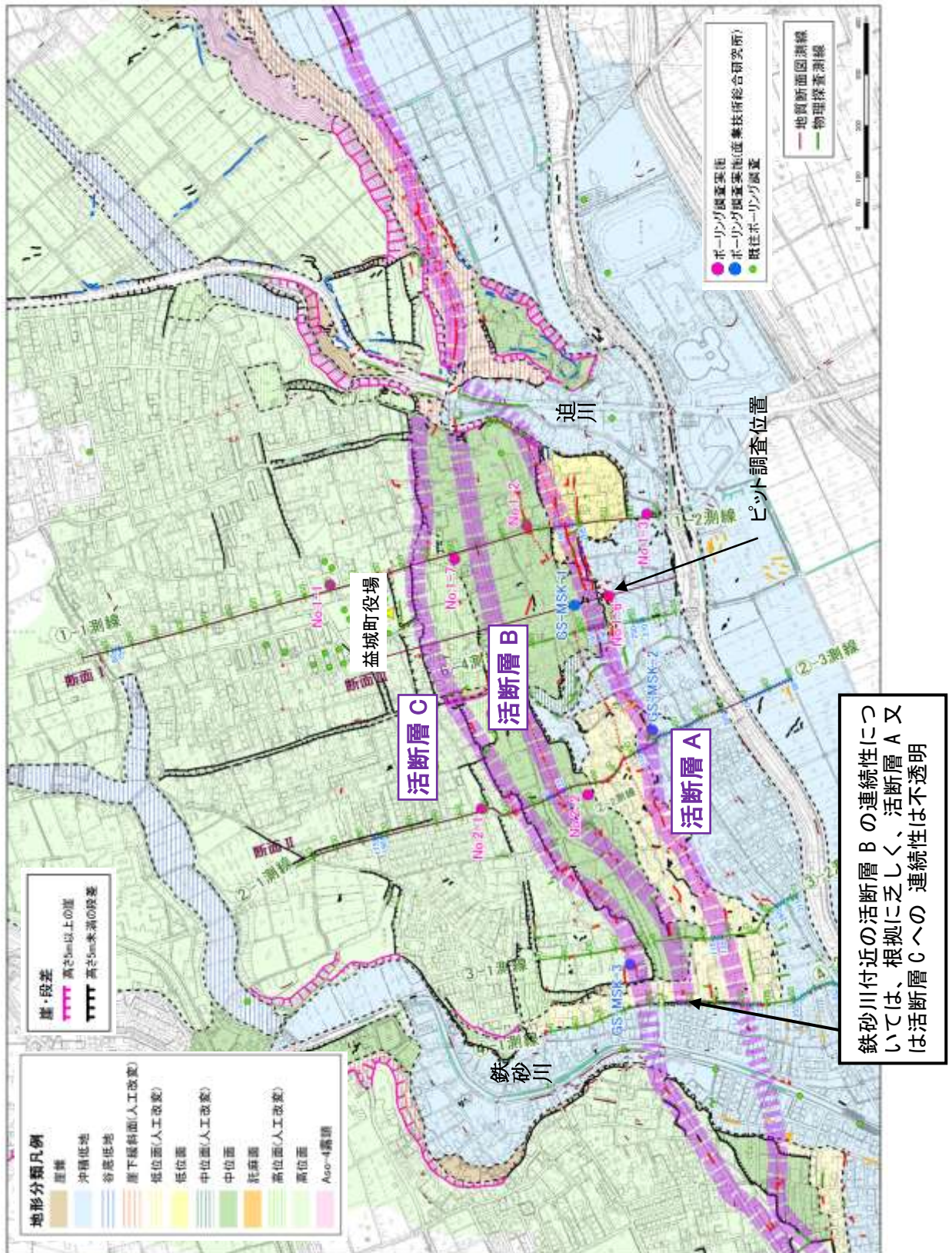


図 3-19 益城町市街地内における活断層位置推定平面図（東側地域）

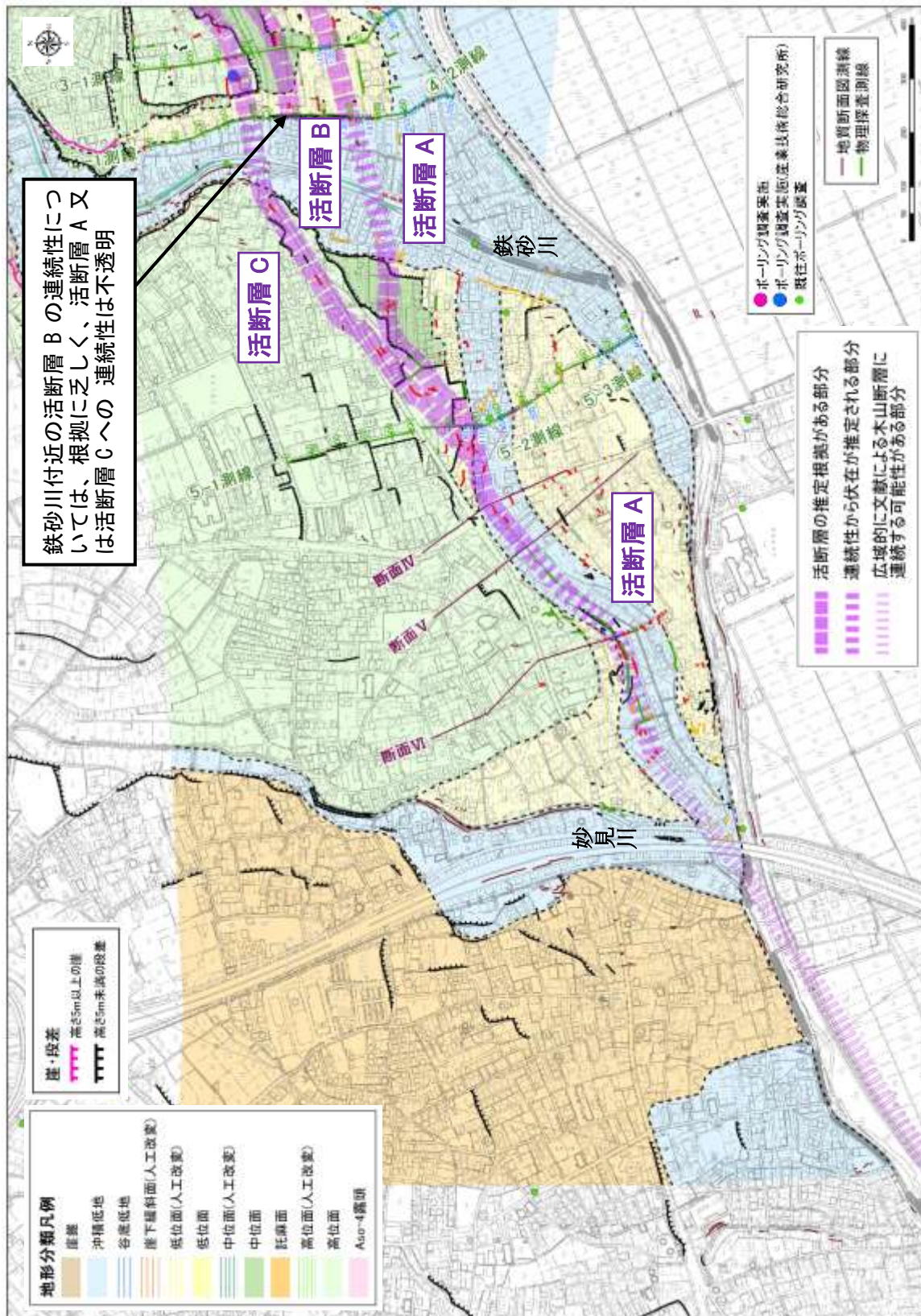


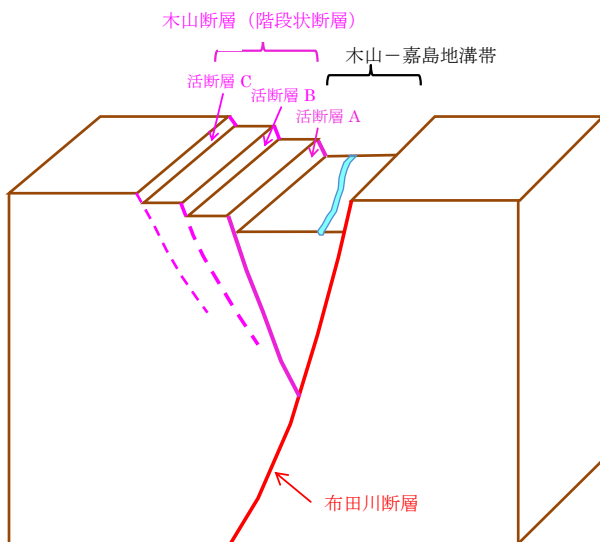
図 3-20 益城町市街地内における活断層位置推定平面図（西側地域）

3) 益城町付近の活断層のメカニズム

益城町付近に位置する3本の活断層A、B、C（木山断層の一部）は、階段状断層（平行で同じ方向に落ちた横ズレを伴う正断層群）と推定され、南側の布田川断層と連動して活動すると推定される。

本地震による活動量（ズレ量）は、活断層Aが最大35cmであるが、活断層Bは最大14cm、活断層Cは最大5cmと活断層Aに比べて小さいことから、階段状断層のうち最も南側の活断層Aが主に活動したと推定される。

なお、活断層B、Cの東側では、本地震による亀裂は確認できていないが、図3-22に示すように、表層が軟弱な地盤の場合には、地表に亀裂等が現れない場合もある。本地震によって活断層B、Cが活動しなかったわけではないと考えられる。



- ・益城町市街地には階段状に3本の活断層が分布する。
- ・上記断層は、南側の布田川断層と連動して活動し、木山-嘉島地溝帯を形成している。

図 3-21 益城町市街地の活断層模式図

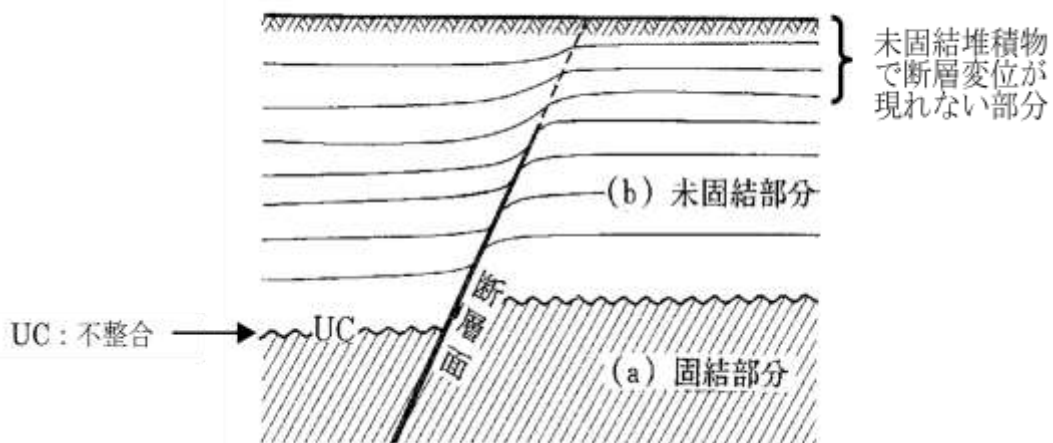


図 3-22 未固結部分での断層の現れ方断面図

地震発生時に未固結であった場合には断層変位があってもズレが生じず、地表に変位が出ない例もある

出典：「地形工学入門」今村遼平（2012）

3.3. 強震動

(1) 益城町市街地における観測記録

益城町市街地には強震観測点が3地点（やや離れた地点にある K-NET 熊本を含む）ある。それぞれの地点の前震、本震の観測記録を以下に示す。

本震では益城町役場で震度7を記録し、最大加速度は KiK-net 益城では 1000gal を上回る大きな地震動を記録している。

表 3-4 益城町周辺での最大加速度及び計測震度（4月14日21時26分）

観測地点	最大加速度 (gal)	計測震度	震度階	備考
KiK-net 益城	925	6.4	6強	
益城町役場	732	6.6	7	役場庁舎 1F
K-NET 熊本	604	5.9	6弱	熊本市東区

表 3-5 益城町周辺での最大加速度及び計測震度（4月16日1時25分）

観測地点	最大加速度 (gal)	計測震度	震度階	備考
KiK-net 益城	1157	6.4	6強	
益城町役場	826	6.7	7	役場庁舎 1F
K-NET 熊本	827	6.0	6強	熊本市東区

各地点の観測地震動の観測地震波形、フーリエスペクトル、加速度・速度応答スペクトル、加速度軌跡図を図 3-23、図 3-24、図 3-25 それぞれに示す。加速度軌跡図（図 3-25）から、益城町外である K-NET 熊本（熊本市東区）を除いた地点では、東西方向の成分が卓越している。

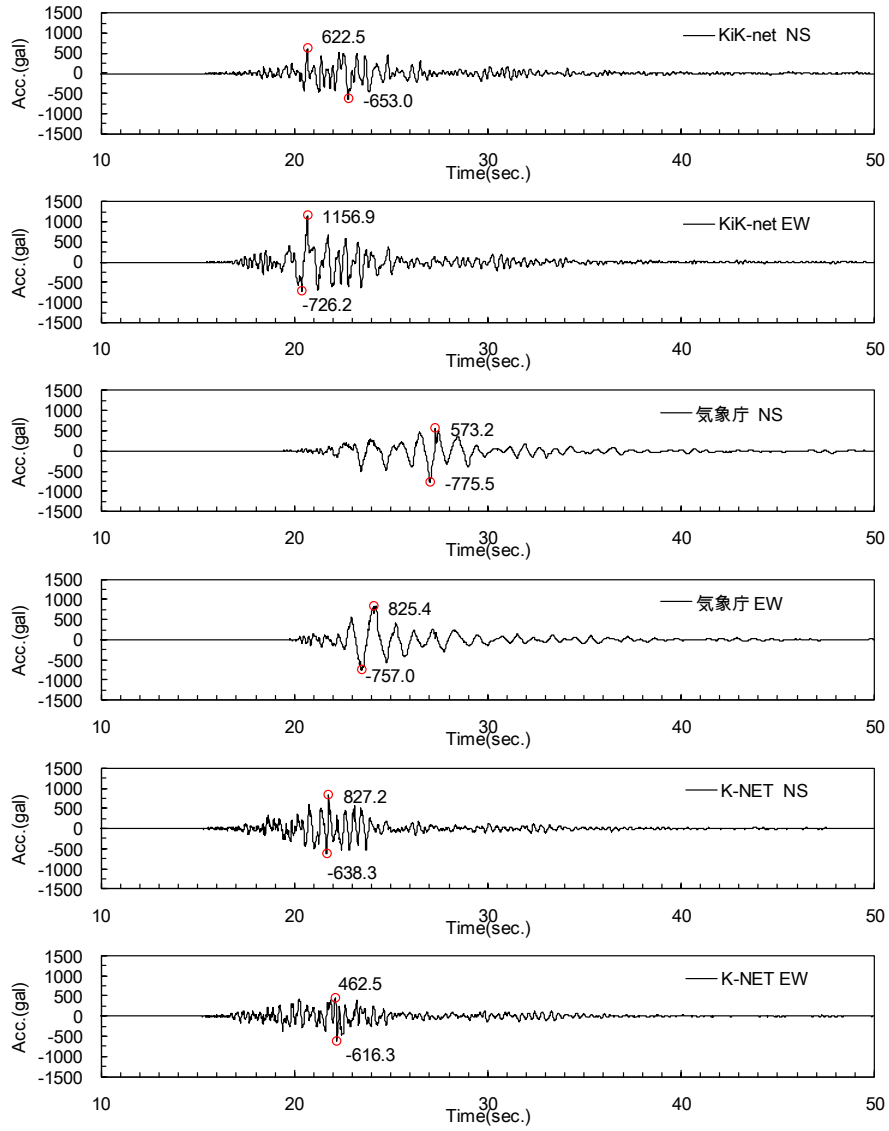


図 3-23 観測地点図と地震観測記録時刻歴図

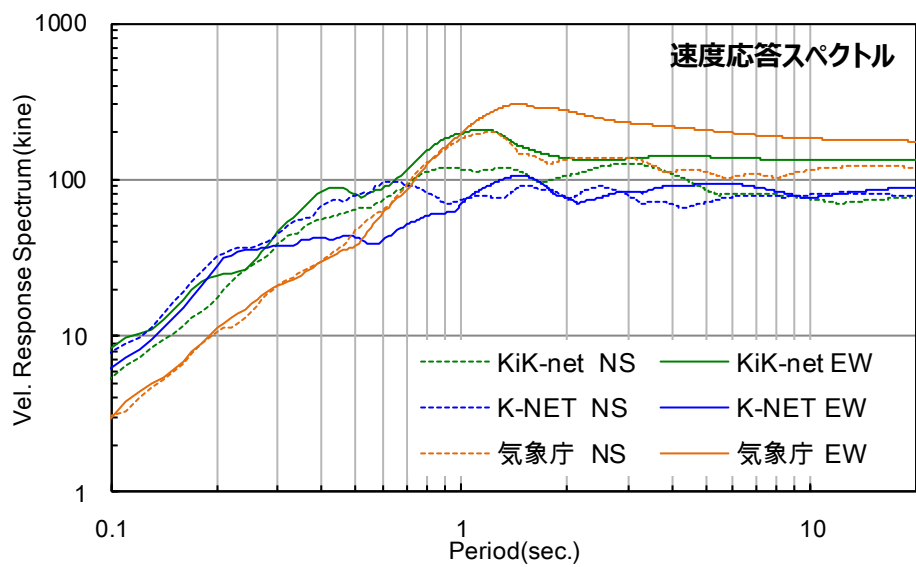
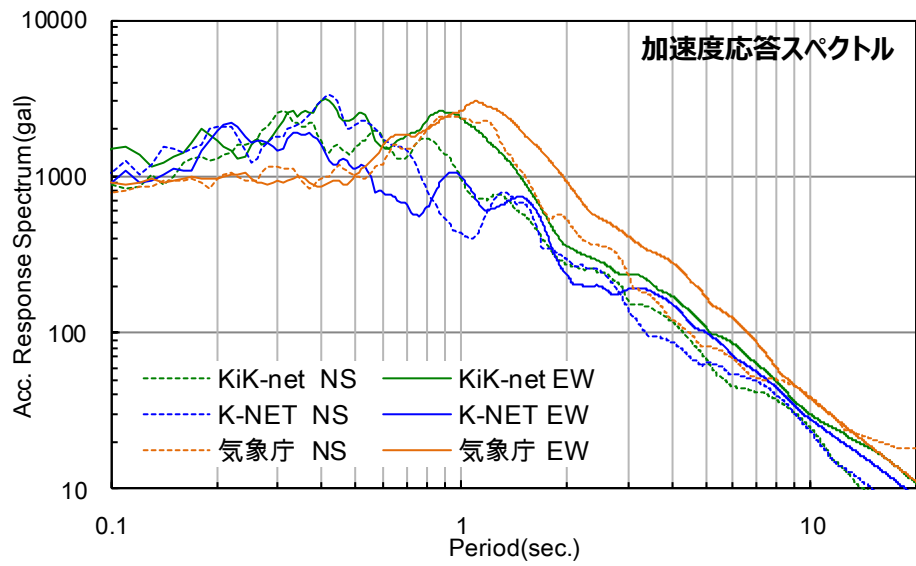
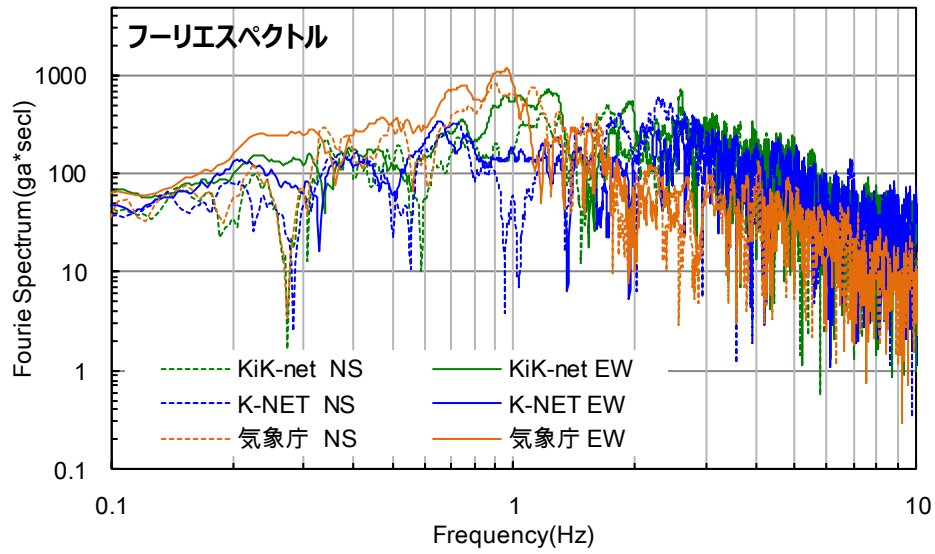


図 3-24 地震観測記録各種スペクトル図

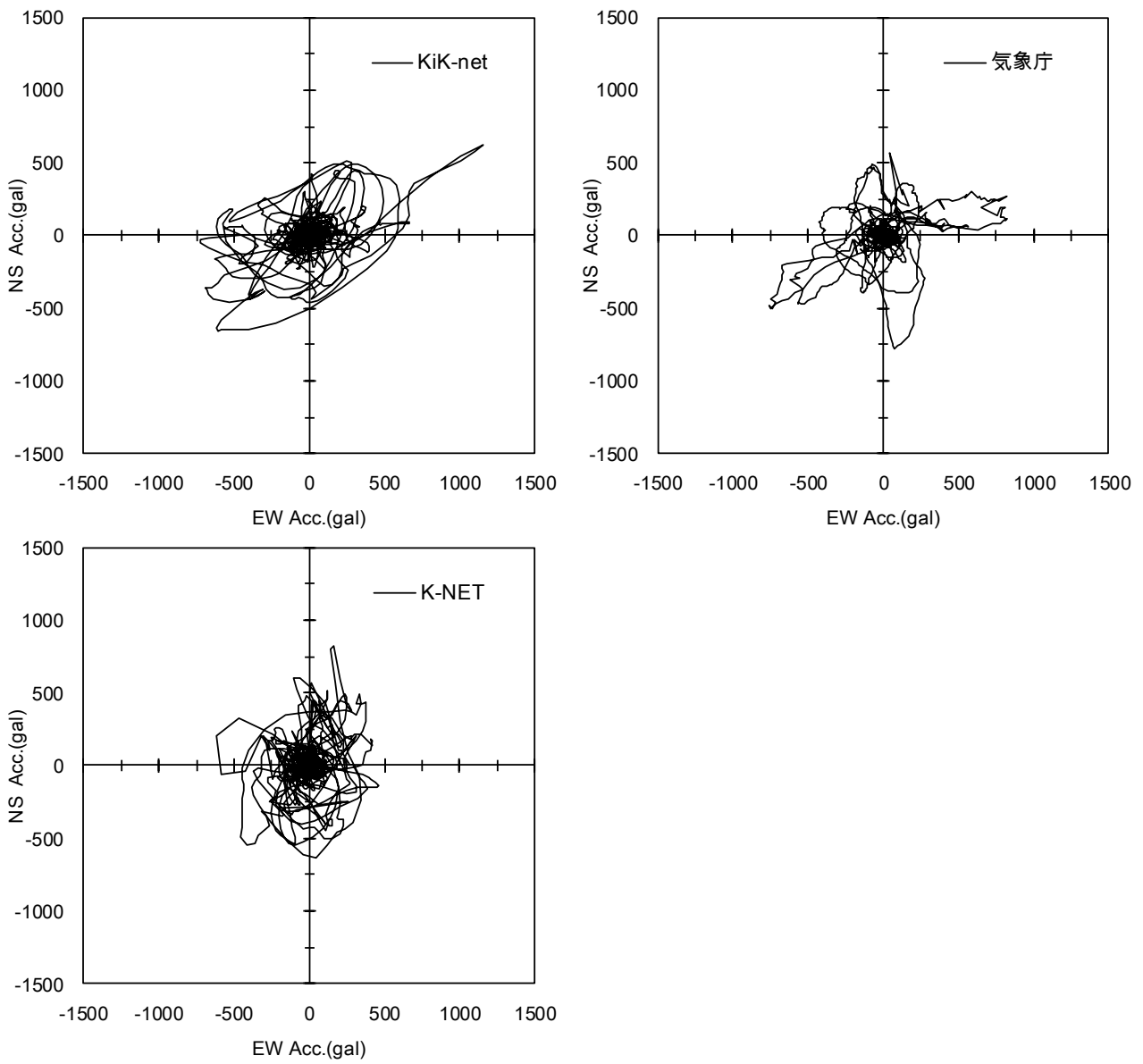


図 3-25 地震観測記録加速度軌跡図

(2) 益城町の地盤振動特性（地盤周期）

益城町の地盤振動特性を把握することを目的に常時微動計測（計測位置は図 3-3 に示す）を行い、H/V スペクトル[※]を算出した。常時微動とは遠方の交通振動や工場振動等により常に発生している微細な揺れであり、常時微動計測結果から算出される H/V スペクトルの卓越周期（卓越周波数）によって、地盤の振動特性（固有周期等）を把握することが可能である。

益城町における代表的な地形分類である沖積低地、低位面、中位面、高位面の H/V スペクトルの平均値を図 3-26 に、平均値と各地点を併記した H/V スペクトルを図 3-27 に示す。

図 3-26 より、H/V スペクトルの卓越周波数帯は、沖積低地が低く（図中左側）、高位面ほど高い（図中右側）結果となっている。卓越周波数が小さな（長周期 図中左側）地盤ほど軟弱な地盤であることから、沖積低地、低位面、中位面、高位面の順に軟弱な地盤であると言える。

図 3-27 の H/V スペクトル図中に卓越周波数帯の目安を赤棒で示した。これより低位面や中位面では卓越周波数帯が沖積低地や高位面より幅広い結果となっている。常時微動計測による H/V スペクトルは、一般にやや深い地盤を含めた振動特性を示すため、これらの地形においては、やや深い地盤の構成に変化が見られる可能性もある。

しかし、以降の地震観測記録に基づく検討では、地表の揺れが大きくなった要因の一つとして表層の軟弱な地盤の影響が大きいと考えられた。このため、揺れやすさの条件について評価を行うためには浅層地盤の特性を直接的に把握することができるボーリングによる土質特性の把握が不可欠であると考えられ、やや深い地盤の影響を受ける H/V スペクトルのみで益城町市街地における揺れやすさの条件を評価することは困難であった。

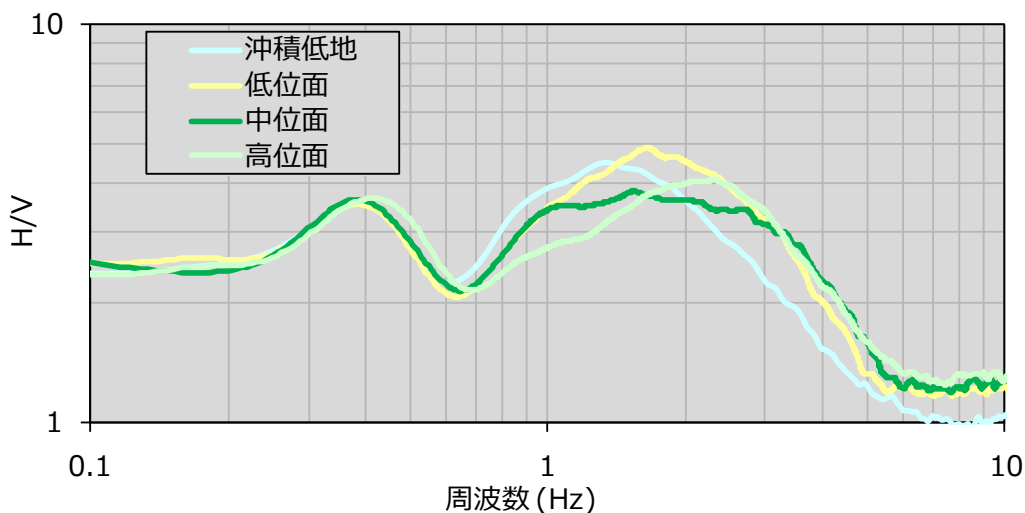


図 3-26 主な地形分類別の H/V スペクトル（平均）

※ H/V スペクトルとは、常時微動計測から得られる微動記録の水平成分を上下成分で除したもの（除算はフーリエスペクトルで実施）であり、数十分程度の地表での計測を行うことにより、地盤の卓越振動数や増幅度を大まかに推定可能とするもの。計算方法や概念図は参考資料 1.3 (P.96) に示す。

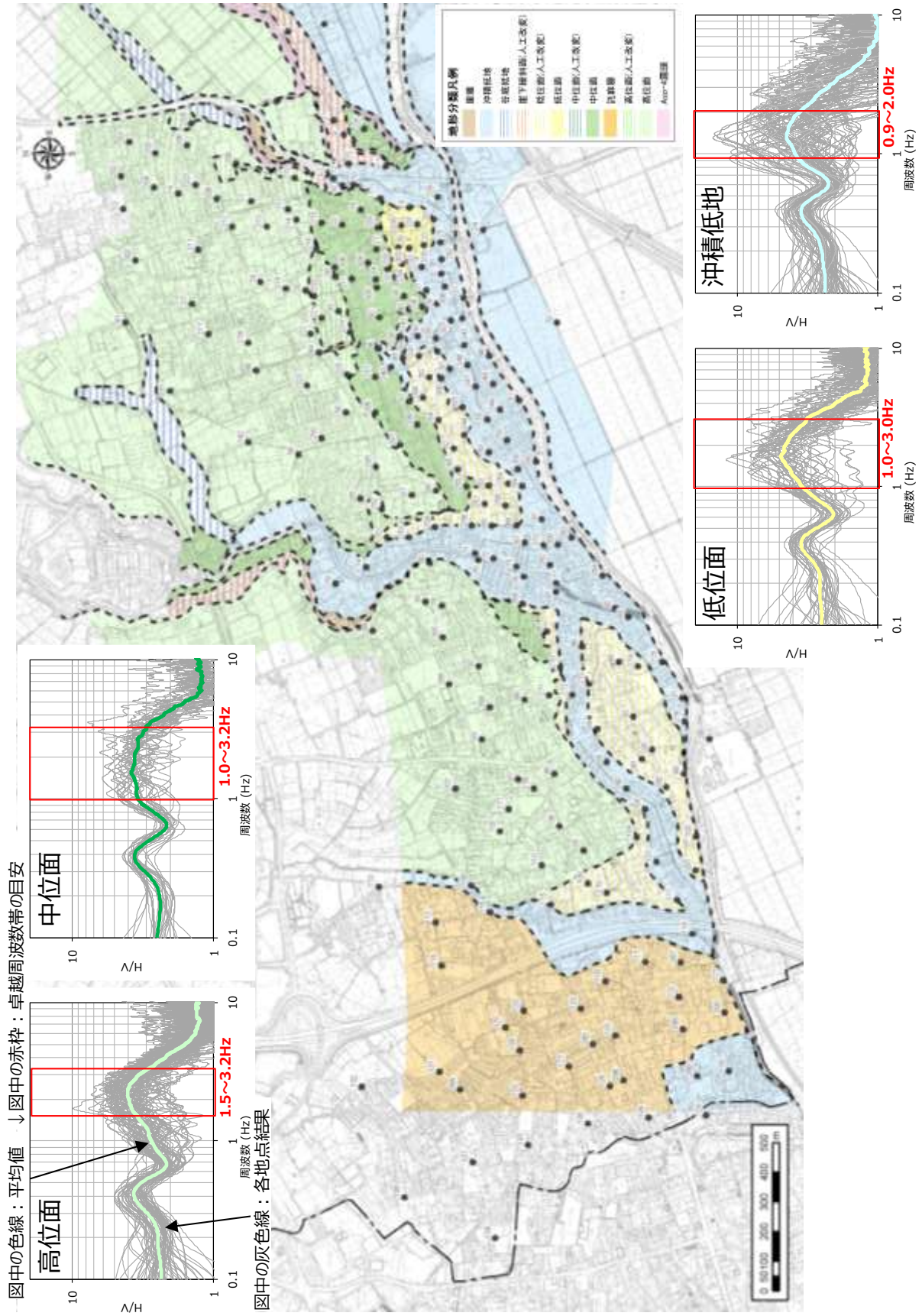


図 3-27 主な地形分類別の H/V スペクトル

(3) 地震観測記録の再現と分析

ここでは、KiK-net 益城の地震応答解析（等価線形化法に基づく一次元地震応答解析（解析コード DYNEQ））を実施し、地震応答解析結果と観測記録を対比し、推定モデルの検証を行った上で、地表の揺れが大きくなった現象の要因を考察した。

入力地震動は、KiK-net 益城における地中観測記録 EW 方向（G.L.-255m）とし、地盤定数は室内土質試験結果を用いた設定を基本とした。試験未実施地点では、同一地形分類の他ボーリング地点の定数を設定した。地層条件はボーリング調査によるものとし、堀止め（Aso-3 上面を確認）以深の地層条件は、KiK-net 益城の地層条件を設定した。

KiK-net 益城の地表面応答結果を図 3-28 に示す。観測地震記録と解析結果を比較するとフーリエスペクトル、応答スペクトルは 1Hz(1 秒) 帯にて卓越し、建築物等に影響を及ぼすと考えられる 1 秒程度より短い周期帯では応答レベルも観測記録と調和的であることから、解析手法、条件及びモデルは妥当であると判断した。

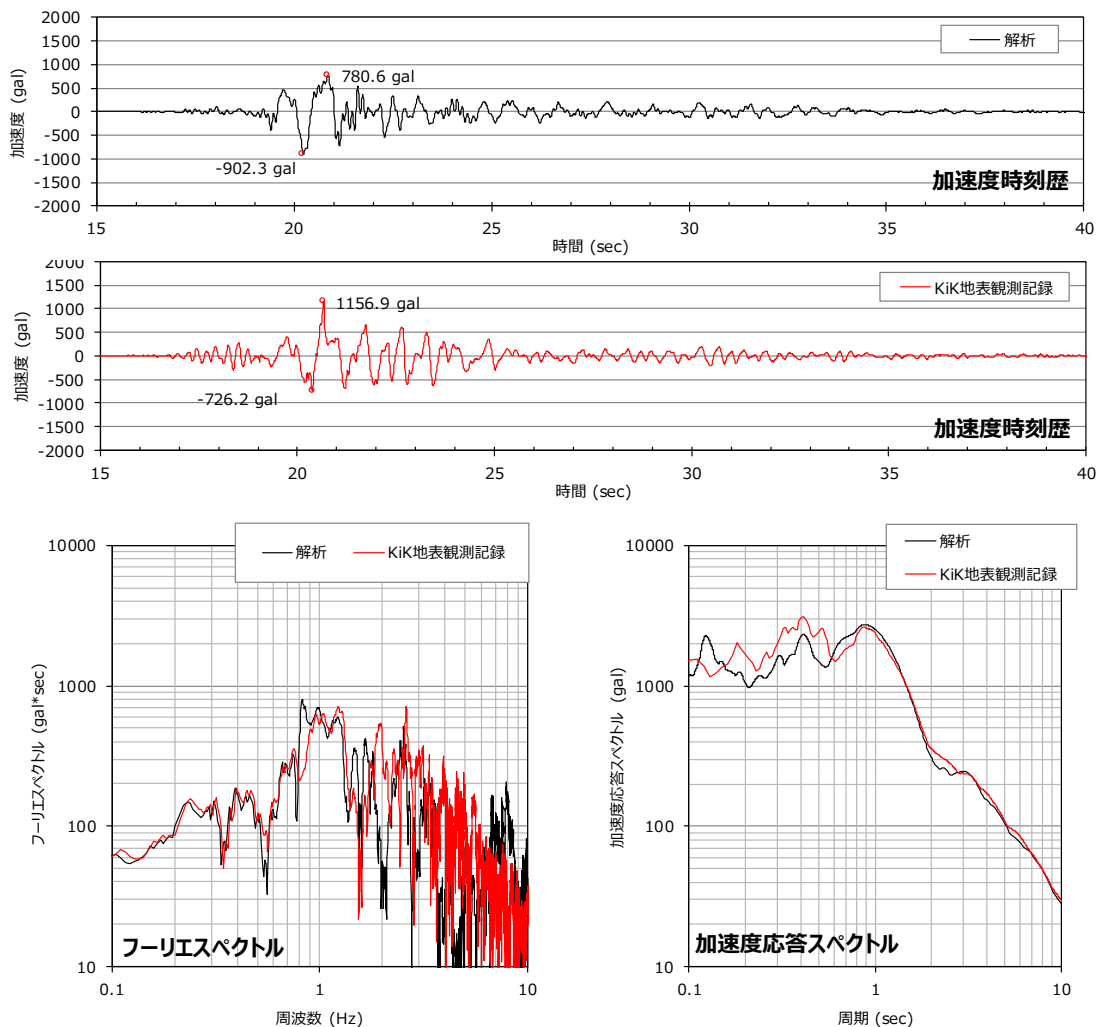


図 3-28 地震観測記録との比較 (KiK-net 益城)

地震動の出典：国立研究開発法人防災科学研究所 HP (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)

水平加速度、せん断ひずみの最大値の深度分布、及び、初期、収束時のせん断剛性の深度分布を図 3-29 に示す。

地表から 10m 程度迄の火山灰質粘土では、深部より大きなせん断ひずみが発生し、水平加速度が増幅する結果となった。地表から 10m 程度のせん断波速度は 110~160m/s であり、表層部に分布する Aso-4 二次堆積物（火山灰質粘土）等のせん断波速度の小さな軟らかい地盤が堆積する地点では揺れがより増幅し、地表で大きく揺れる結果となった可能性がある。

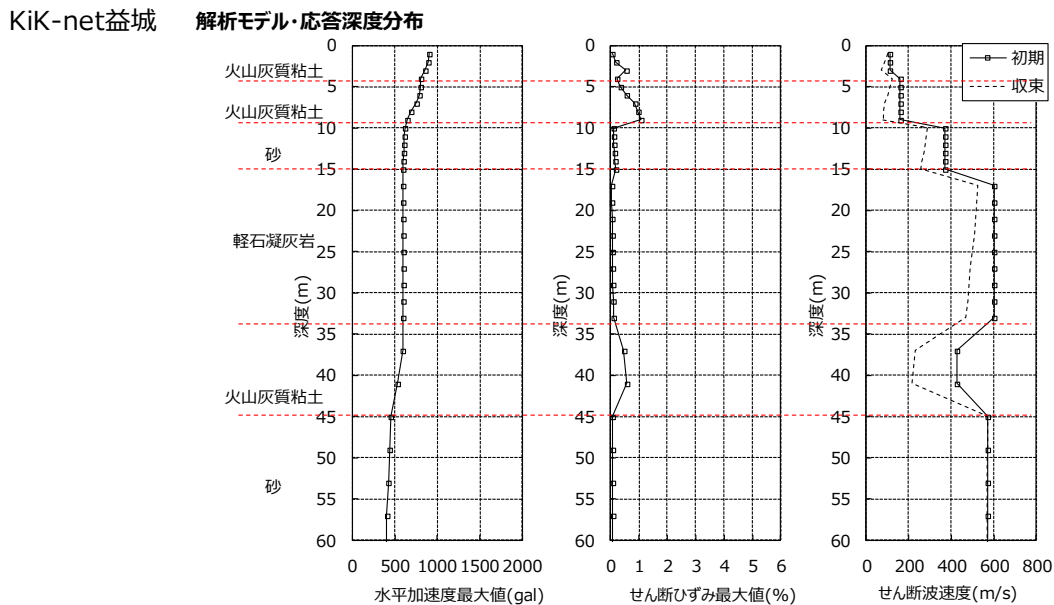


図 3-29 地震応答解析結果深度分布

(4) ボーリング調査地点での強震動の推定

地震観測地点での地震応答解析結果から、表層の地盤の特性が地表での大きな揺れに影響を与えていることが推測された。

ここではせん断波速度を把握するための PS 検層が実施されているボーリング調査地点の内、Aso-4 二次堆積物のせん断波速度が小さな調査地点（GS-MSK-1, GS-MSK-2, No.2-2）の地震応答解析を実施し、地震観測地点での解析結果により検証を行った。解析実施地点を図 3-30 に示す。

表 3-4 地震応答解析実施地点概要

解析地点	地形分類	地震観測地点
KiK-net 益城	高位面	KiK-net 益城
GS-MSK-1	中位面	-
GS-MSK-2	低位面※	-
No. 2-2	中位面	-
安永橋	沖積低地	-

※沖積低地との境界部に位置しているが、ボーリング調査結果より低位面と分類

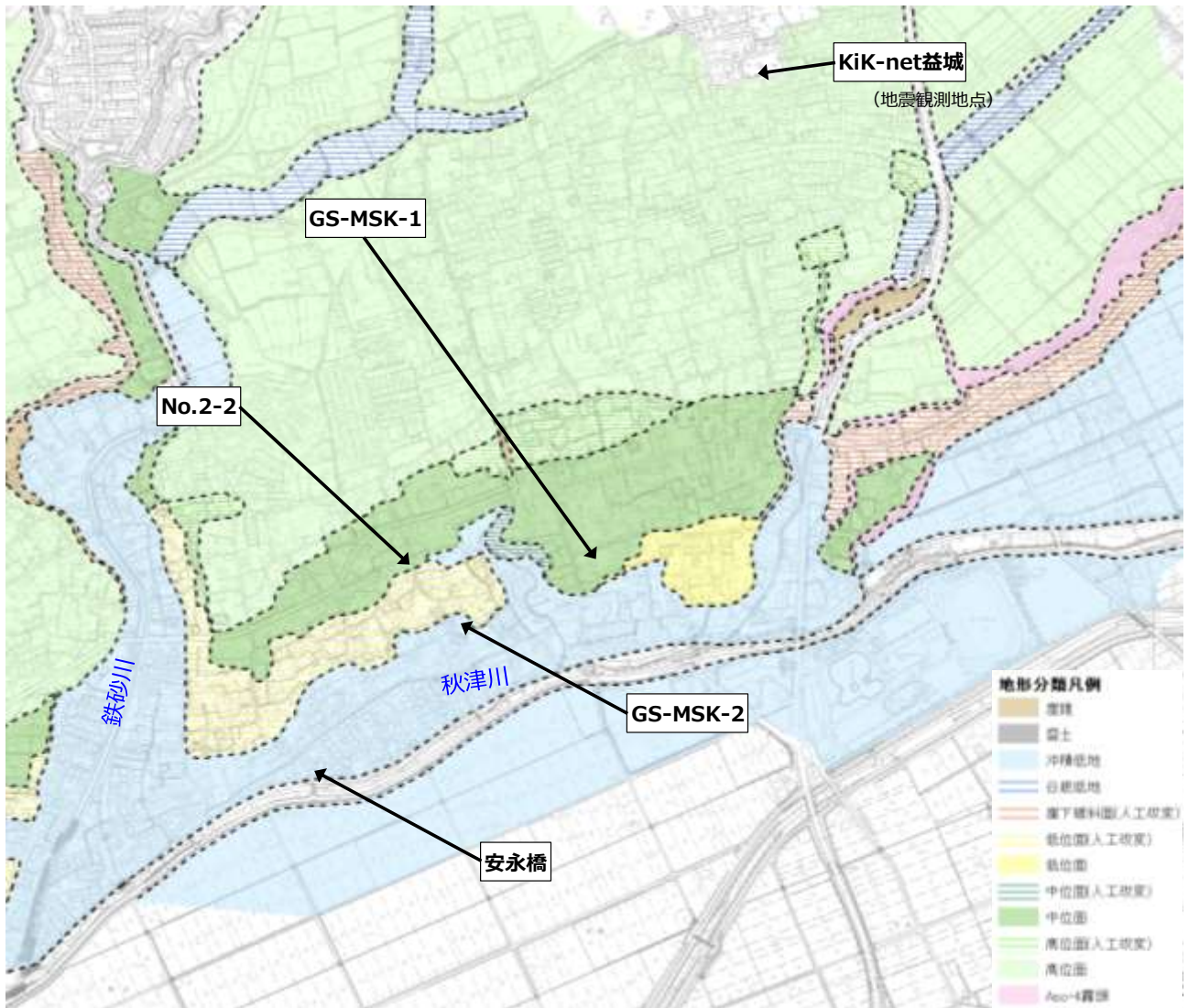


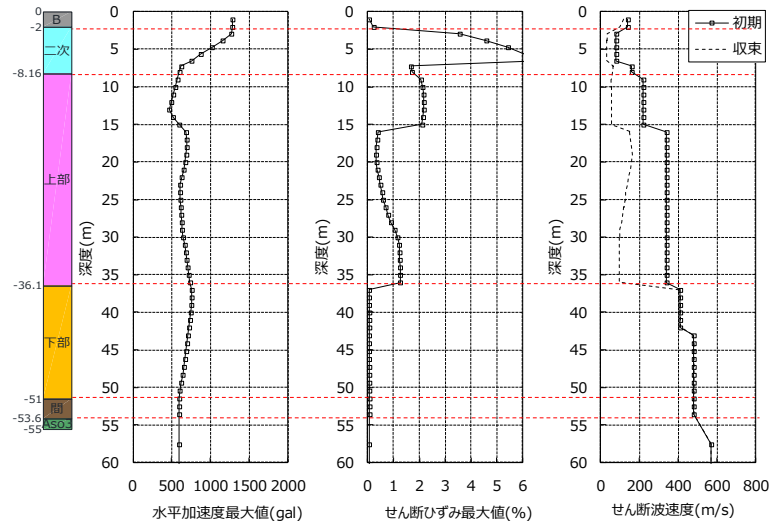
図 3-30 地震応答解析実施地点

水平加速度、せん断ひずみの最大値の深度分布、及び、初期、収束時のせん断剛性の深度分布を図 3-31 に示す。図 3-31 より、Aso-4 二次堆積物にて大きなせん断ひずみが発生し、水平加速度が増幅する結果となり、KiK-net 益城の地震応答解析と同様の傾向である。

以上より、地表で揺れが大きくなった要因は、中位面、低位面で分布する緩い Aso-4 二次堆積物等の表層の地盤条件（層厚と非線形特性）による可能性がある。

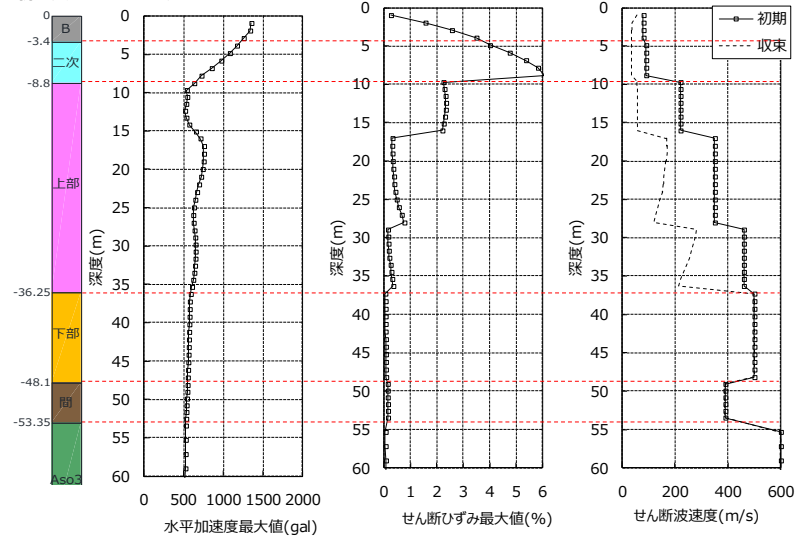
GS-MSK-1

解析モデル・応答深度分布



GS-MSK-2

解析モデル・応答深度分布



No.2-2

解析モデル・応答深度分布

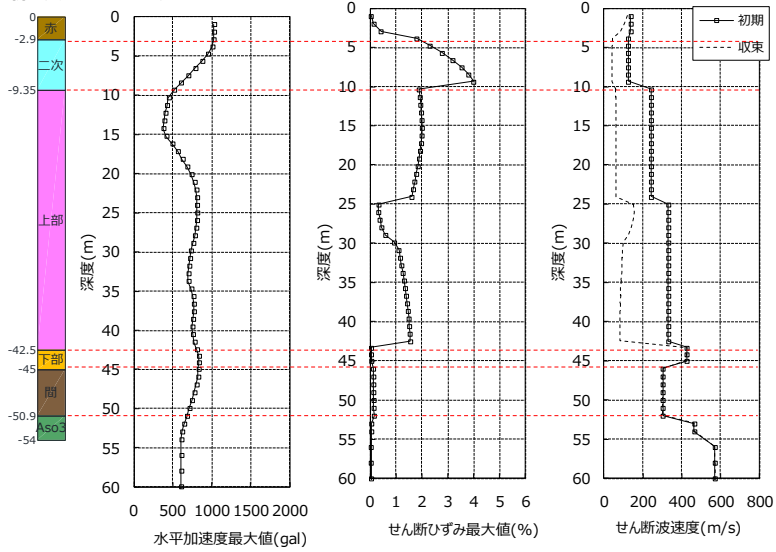


図 3-31 地震応答解析結果深度分布

一方、沖積低地のボーリング（秋津川沿いの安永橋）は、(2)で示した通り、軟弱な沖積層が堆積している。

沖積低地部の地震応答解析結果として、水平加速度、せん断ひずみの最大値の深度分布、及び、初期、収束時のせん断剛性の深度分布を図 3-32 に示す。地表から 13m 程度迄が沖積層であり、主に沖積粘性土層にて加速度の減衰が見られ、地表の応答の増幅は少ない結果であった。

以上より、沖積層が堆積する沖積低地部の地表の揺れは、中位面、低位面の結果（図 3-31）と比較すると小さくなる結果となっており、本震時の地表の揺れも沖積低地部では相対的に小さかったと推測される。

ただし、今回の熊本地震とは異なる地震動の場合には強震動の特性が異なることから、強震動の推定結果や相対的な揺れやすさの傾向も異なることに留意する必要がある。

強震動は、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性（増幅特性及び位相特性）で構成され（図 3-33）、本地震のように近傍の地点にも係らず揺れの大きさが異なる理由は、震源断層との位置関係（ディレクティビティ）の他、サイト特性の違いによる影響が大きいものと考えられる。

サイト特性は、やや深い地盤の増幅特性（サイト増幅特性と呼ぶ）と表層の軟弱地盤の影響（非線形性）に分けることができ、益城町市街地で被害が集中した理由の一つとして表層の軟弱地盤の影響が大きいと本調査では評価している。ただし、いわゆる地震工学的基盤面（ $V_s=3\text{km/s}$ 程度）から工学的基盤面（ $V_s=300\text{m/s}$ 程度）までのやや深い地層構成が大きく変化するような範囲では、サイト増幅特性が強震動の違いに与える影響が大きくなることから、常時微動計測等によりやや深い地盤の振動特性を把握した上で揺れやすさの検討を行っていくことが考えられる。

なお、震源近傍の強震動の評価技術については現在様々な機関において精力的に研究が進められており、最新の知見により明らかになっていくものと思われる。

■ 解析モデルと応答深度分布図

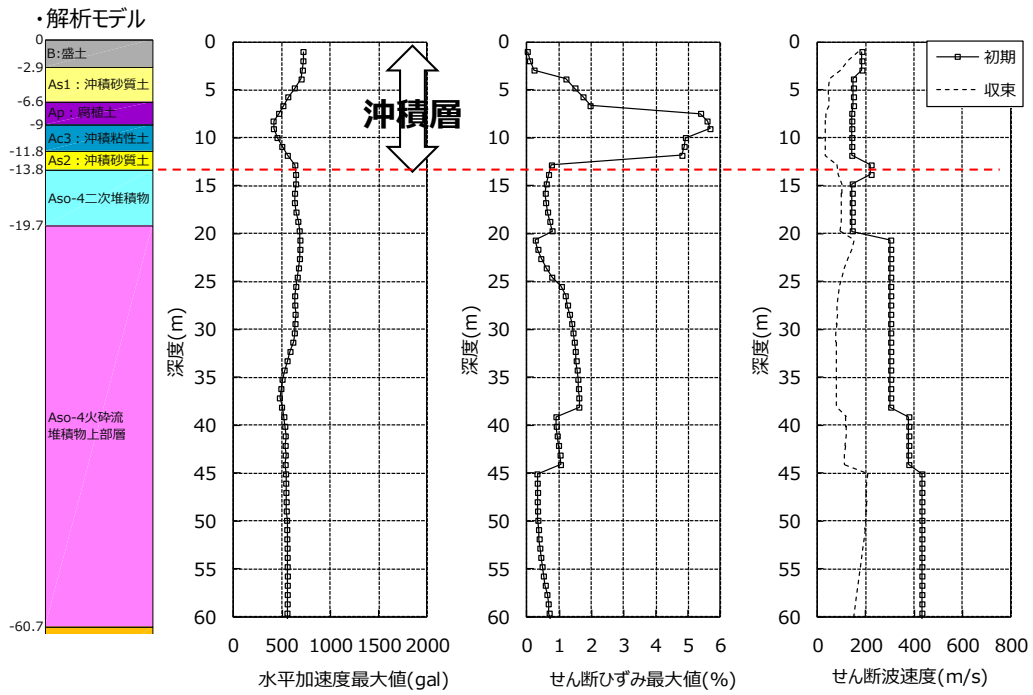


図 3-32 沖積低地部感度解析結果（沖積低地部）

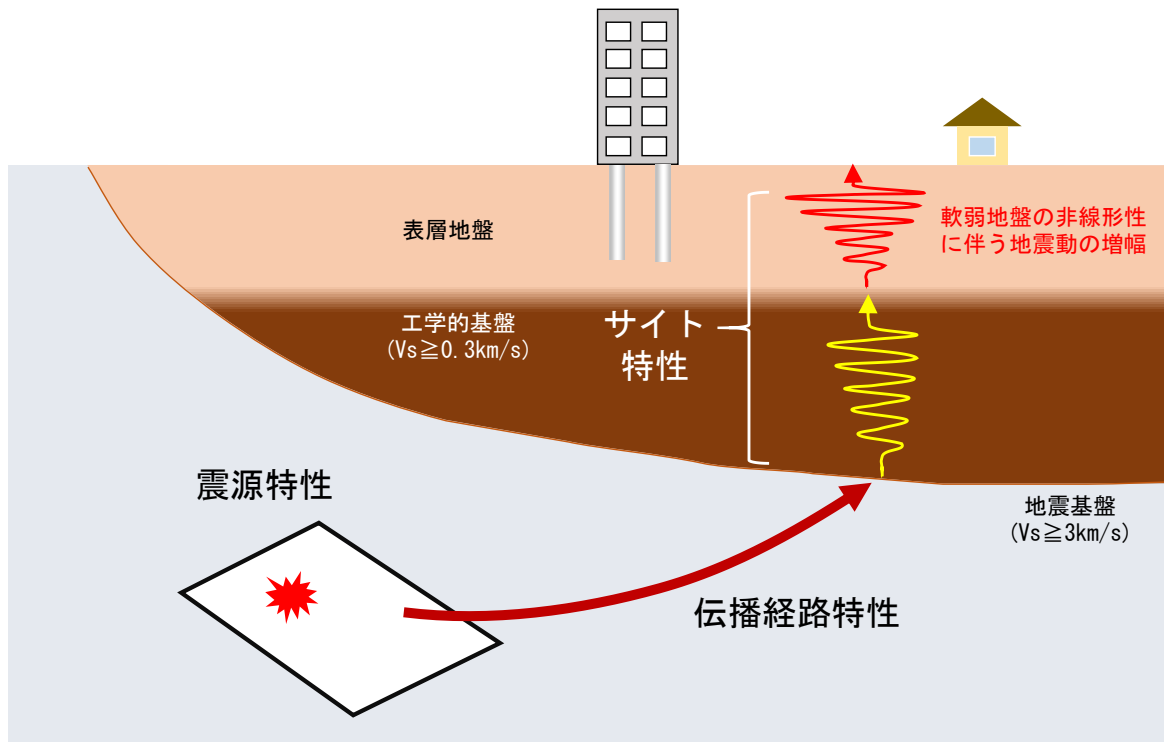
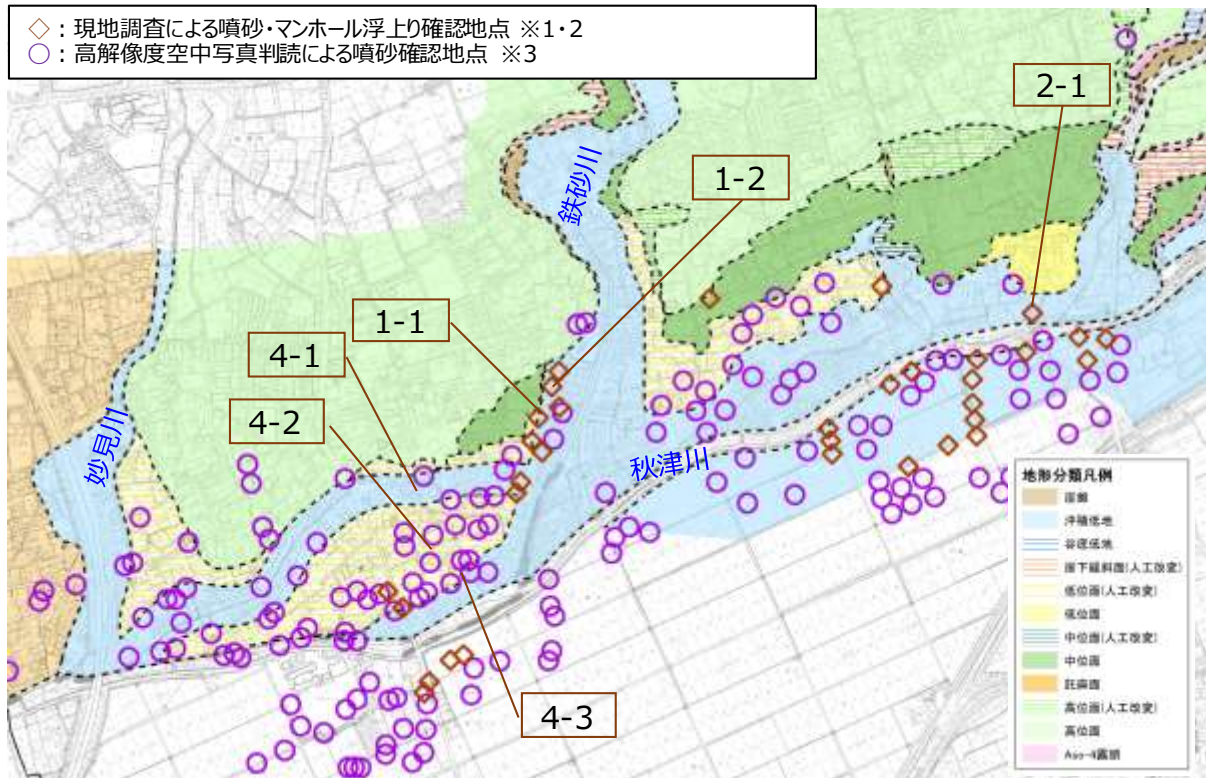


図 3-33 地震波の発生と地表への伝播の概念図

3.4. 液状化

(1) 熊本地震における液状化被害と地層状況

地震後に調査された文献類を整理し、液状化被害状況図を作成した。液状化は主に沖積低地、鉄砂川～妙見川間の低位面（中州状）にて噴砂、マンホールの浮上り、埋め戻し材や電柱の沈下等が確認されているが、地盤全体が広域的に液状化するような事象は確認できなかった。



※出典

- 1.平成28年（2016）熊本地震の被害報告：液状化現象の発生状況と被害について【速報】 大分大学教育学部 地理学教室 小山 拓志
- 2.2016年熊本地震による地盤災害（益城町・西原村） 東京大学 生産技術研究所 清田研究室 清田隆、萩野知
- 3.高解像度空中写真判読による噴砂確認 防災科学技術大学研究所 先名重樹
- 4.本報告内の調査にて撮影

図 3-34 液状化被害状況図

秋津川沿いの地層状況より、沖積低地部は粘性土（Ac 層）が主体の地盤であり、粘性土中に砂質土層が介在する地層構成であることが分かる。また、ボーリング孔内水位による地下水位は概ね地表から数 m の深度に分布する。

■ 沖積低地部の地層状況 秋津川沿い ※鉄砂川東側

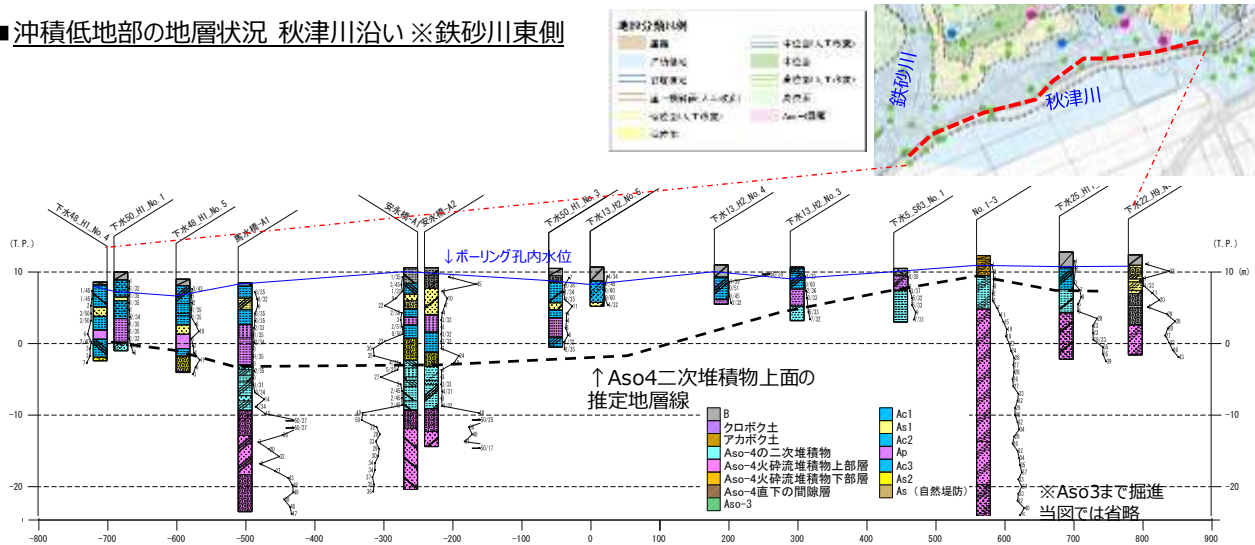


図 3-35 沖積低地部の地層状況 秋津川沿い ※ボーリング柱状図より作成

益城町西部の南北方向の地層状況より、南側の秋津川周辺の沖積低地部は、粘性土（Ac 層）が主体の地盤である。秋津川と旧河川間の低位面では、部分的に砂質土層（自然堤防）が分布している。ボーリング孔内水位による地下水位は概ね地表から数 m の深度に分布する。

■ 地層状況 益城町西側 南北方向

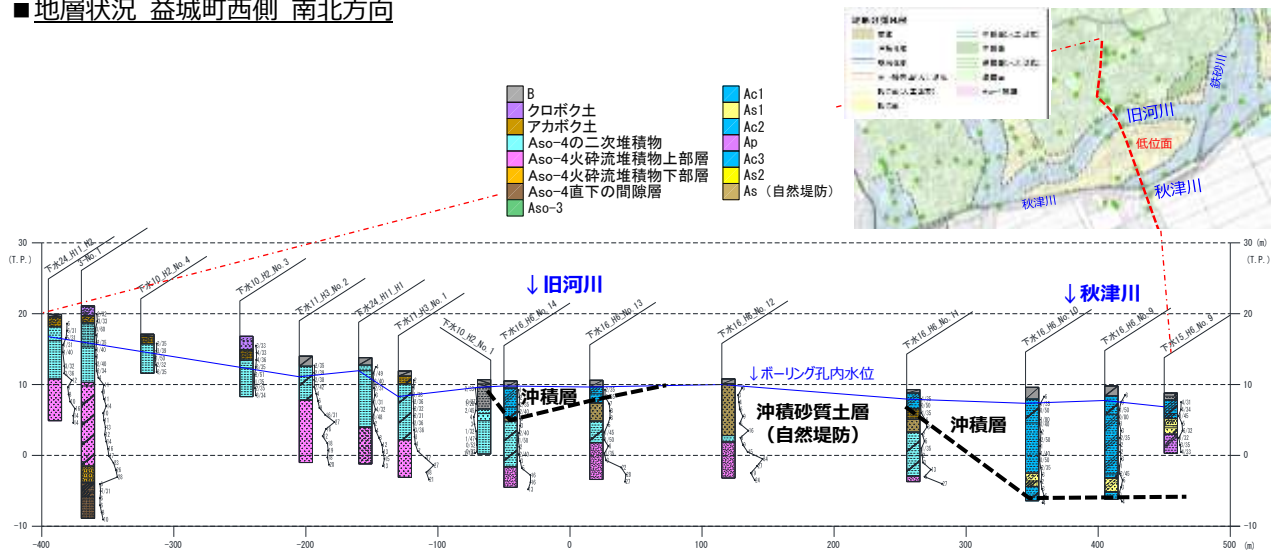


図 3-36 沖積低地部の地層状況 益城町西側南北方向 ※ボーリング柱状図より作成

(2) 液状化判定

主に沖積低地部での液状化が見られたことから、沖積低地部の安永橋 A2 地点に対して、現行指針類（建築基礎構造設計指針・宅地防災マニュアル）に基づいた液状化判定を実施した。

液状化判定（FL法の必要性）の結果、主に砂質土（As層）および火山灰質砂（Aso-4 上部層）が FL法による液状化判定の必要性がある層に該当し、粘性土（Ac層 Ap層等）は必要性のない結果となった。液状化判定の必要性がある As層、Aso-4 上部層に対して、液状化判定（FL法）を実施した結果、安永橋 A2 地点では、中規模地震時、大規模地震時にて $FL \leq 1.0$ となる深度が発生し、主に As層（砂質土層）にて液状化が想定される結果となった。

以上より、今回の地震では全面的な地盤の液状化被害が生じなかった要因は、沖積低地部が粘性土主体の地層であったためと考えられる。ただし、(1)で示したように、埋設管等の埋戻し材料が液状化し、ライフラインに被害をもたらした事例は多く確認されている。

表 3-5 室内土質試験による液状化の判定（FL法の必要性）

土質	データ数	細粒分 Fc (%)	粘土分 C (%)	塑性 指数 Ip	判定 (FL法) の必要性			液状化 強度比 RL20		
					I Fc ≤ 35	II C ≤ 10 IP ≤ 15	必要性 Iが○ もしくは IIの一方が○			
赤ボク	火山灰質シルト	1	92.1	46.3	26.7	×	×	×	無	-
Ac	沖積粘性土	5	54.5~90.3	13~38.9	22.7~110.8	×	×	×	無	-
Ap	有機質土	3	63~86.4	24.4~46.8	27.7~196.3	×	×	×	無	-
As	沖積砂質土	1	9.0	5.3	0 (NP)	○	○	○	有	0.259
Aso4二次	火山灰質シルト	3	56.3~73	32.9~34.4	17.7~21	×	×	×	無	-
Aso4上部	火山灰質砂	2	34~38.9	13.9~24.2	0 (NP)	○	×	○	有	0.326,0.6

【補足】液状化の判定（FL法の必要性）建築基礎構造設計指針・宅地防災マニュアル より抜粋
 液状化の判定を行う必要がある飽和土層は、一般に、 I：地表面から20m 程度以浅の沖積層、細粒分含有率が35%以下の土とする。ただし、細粒分含有率が35%以上であっても、 II：粘土分含有率が10%以下、または、塑性指数が15%以下の土は、液状化の判定（FL法）を行う。

表 3-6 液状化の判定（FL法）

地質名	深度 (m)	N値	Fc (%)	補正N値 Na	液状化 抵抗比 τ_1/σ'_v	中規模地震時		大規模地震時	
						地震せん断 応力比 T_d/σ'_v	液状化 抵抗 FL	地震せん断 応力比 T_d/σ'_v	液状化 抵抗 FL
B	1.3	12	0	27.47	0.6	0.129	4.657	0.301	1.996
B	2.3	45	0	84.64	0.6	0.152	3.959	0.354	1.697
As1	3.3	4	9	11.34	0.139	0.162	0.862	0.377	0.369
As1	4.3	10	9	19.44	0.225	0.166	1.353	0.388	0.58
As1	5.3	7	9	14.17	0.159	0.169	0.945	0.393	0.405
As1	6.3	4	9	9.76	0.129	0.169	0.76	0.395	0.326
Ap	7.31								
Ap	8.3								
Ac3	9.31								
Ac3	10.31								
Ac3	11.3								
As2	12.3	24	9	28.59	0.6	0.176	3.418	0.41	1.465
As2	13.3	18	9	21.89	0.293	0.172	1.705	0.401	0.731
Aso4二次堆積物	14.3								
Aso4二次堆積物	15.3								
Aso4二次堆積物	16.32								
Aso4二次堆積物	17.31								
Aso4二次堆積物	18.3								
Aso4二次堆積物	19.31								
Aso4火砕流堆積物上部	20.3	48	34	47.8	0.6	0.158	3.803	0.368	1.63
Aso4火砕流堆積物上部	21.28	50	34	48.48	0.6	0.155	3.88	0.361	1.663
Aso4火砕流堆積物上部	22.3	36	34	36.89	0.6	0.151	3.966	0.353	1.7
Aso4火砕流堆積物上部	23.3	40	34	39.28	0.6	0.148	4.054	0.345	1.737
Aso4火砕流堆積物上部	24.3	31	34	32.08	0.6	0.145	4.146	0.338	1.777
Aso4火砕流堆積物上部	25.24	49	34	44.58	0.6	0.142	4.237	0.33	1.816

【補足】液状化の判定（FL法）の外力
 建築基礎構造設計指針・宅地防災マニュアル より抜粋
 ・中地震時（地表面加速度150gal）
 ・大地震時（地表面加速度350gal）

液状化の判定（FL法） $FL \leq 1.0$ にて液状化※表中赤字

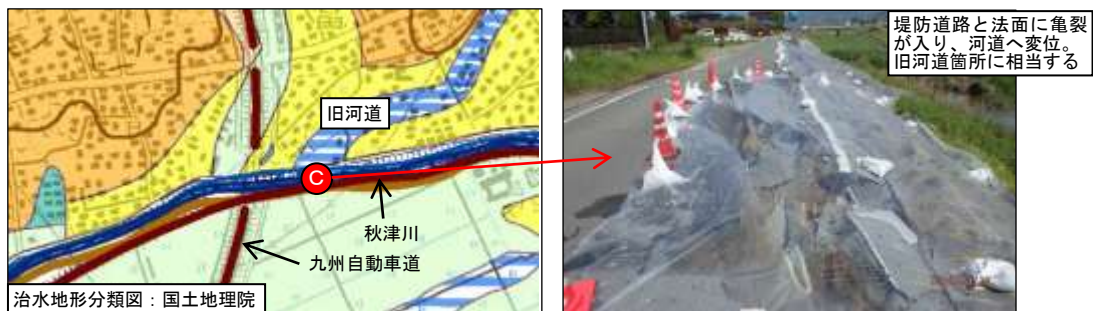
3.5. 側方流動（広域的な地盤変位^{※1}）

(1) レーザー計測及び測量結果に基づく地盤変位

地震前後のレーザー計測による水平方向の地盤変位図（図 3-38）では、全般的には東～東北東方向の水平変位が卓越している。秋津川や鉄砂川沿いでは、一部でこれとは異なる方向の変位がみられたため、堤防付近での局所的な地盤の流動化（図 3-37）による可能性が考えられるが、秋津川沿いでは宅地や建築物への直接的な被害はほとんど見られなかった。

被害の大きかった鉄砂川の東側～国道 443 号までのエリアについては、詳細調査として実測により地震後の測量基準点の座標データを取得し、測量結果と地震前の座標データを用いて水平方向の地盤変位図を算出した（図 3-39）。図 3-38 と同様、東～東北東方向の水平変位が卓越し、同様な傾向となっている。

益城市街地は南側に向かって標高が低くなる地形（図 3-40）であるため、側方流動による広域的な地盤変位が発生した場合、南方向のベクトルが卓越すると考えられるため、今回の地震においては広域的な地盤変位（側方流動）は発生していないと考えられる。



※出典：2016 年熊本地震による地盤災害 東京大学生産技術研究所 清田隆

図 3-37 河川堤防の側方流動による被災事例（益城町福富地区）

(2) 地盤のすべり安定解析

清田らの現地調査結果^{※2}によれば、すべり変形が生じた証左となるような、東西方向に連続した南落ちの亀裂は確認できないことが報告されている。また、南北断面における二次元すべり安定解析結果でも益城市街地の地盤は十分な安全率（設計水平震度 0.5^{※3}において安全率 1.0 を満足（ $F_s=1.094$ ）を持つという結果が出ていることから、広域的な地盤変位（側方流動）は生じていないものと判断する（参考資料 3 ,P.112）。

※1) ここでの側方流動は、市街地の表層部に分布する軟弱粘性土層の地震動による塑性変形を対象とし、地盤の液状化による側方流動は 3.4 に記述した。

※2) 清田 隆 「2016 年熊本地震による地盤災害 平成 28 年度 土木学会全国大会 特別セッション熊本地震報告会」

※3) 道路土工・盛土工指針(2012.4)では、実施に生じる地震動の大きさと安定計算に用いる震度の大きさの関係について、「工学的判断として最大加速度 800gal 程度のレベル 2 地震動に対応する水平震度は 0.2 程度でよい」としている。したがって、設計水平震度 0.5 は最大加速度 2,000gal 程度に相当し、熊本地震の最大加速度 (1,490gal) に対しては安定性を確保していると判断することができる。

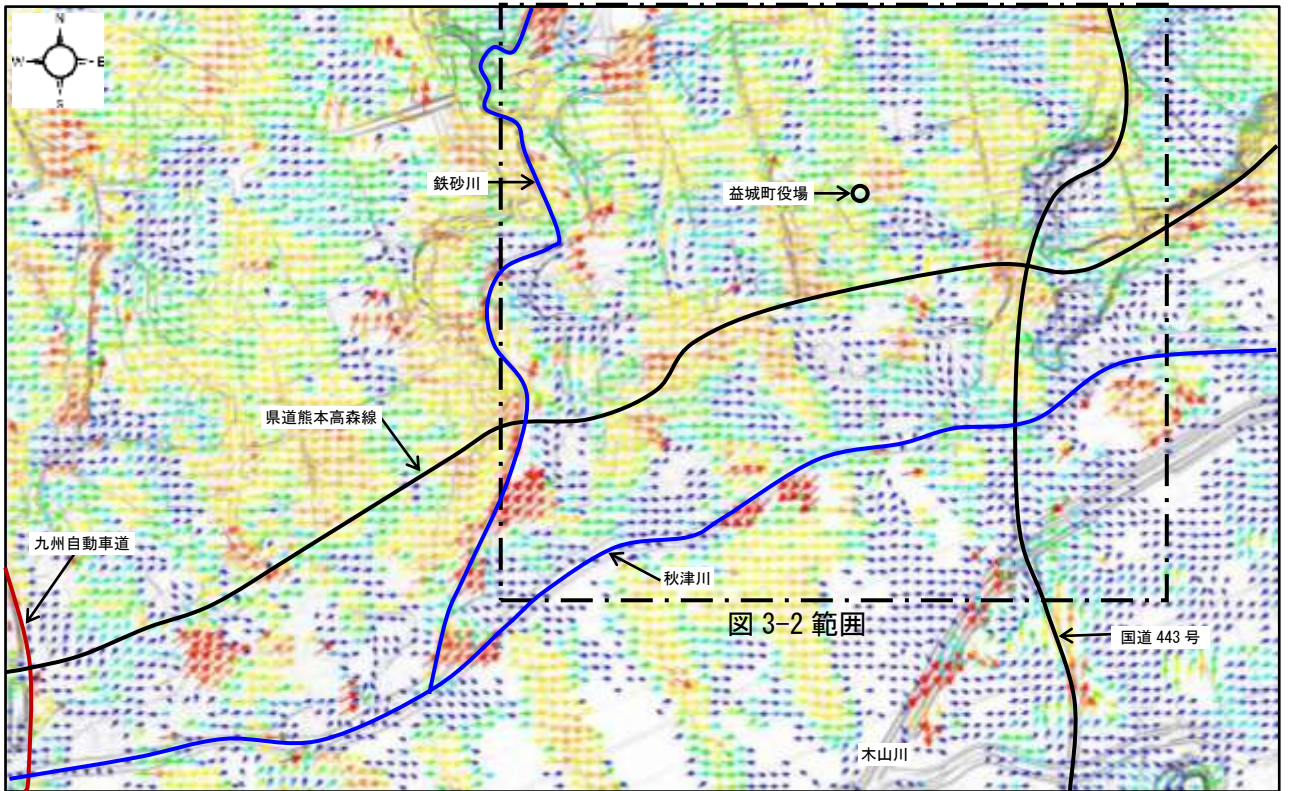


図 3-38 熊本地震（前震・本震含む）による水平方向の地盤変位（レーザー計測）

「国土地理院及び国際航業(株)資料」より

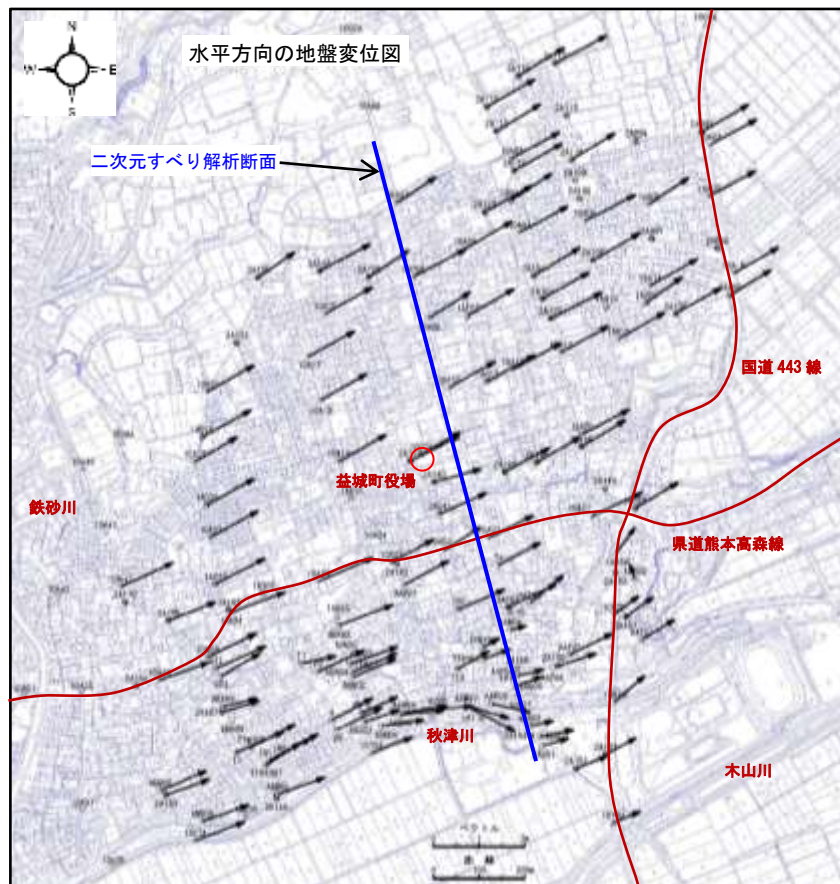


図 3-39 熊本地震（前震・本震含む）による水平方向の地盤変位（測量結果）

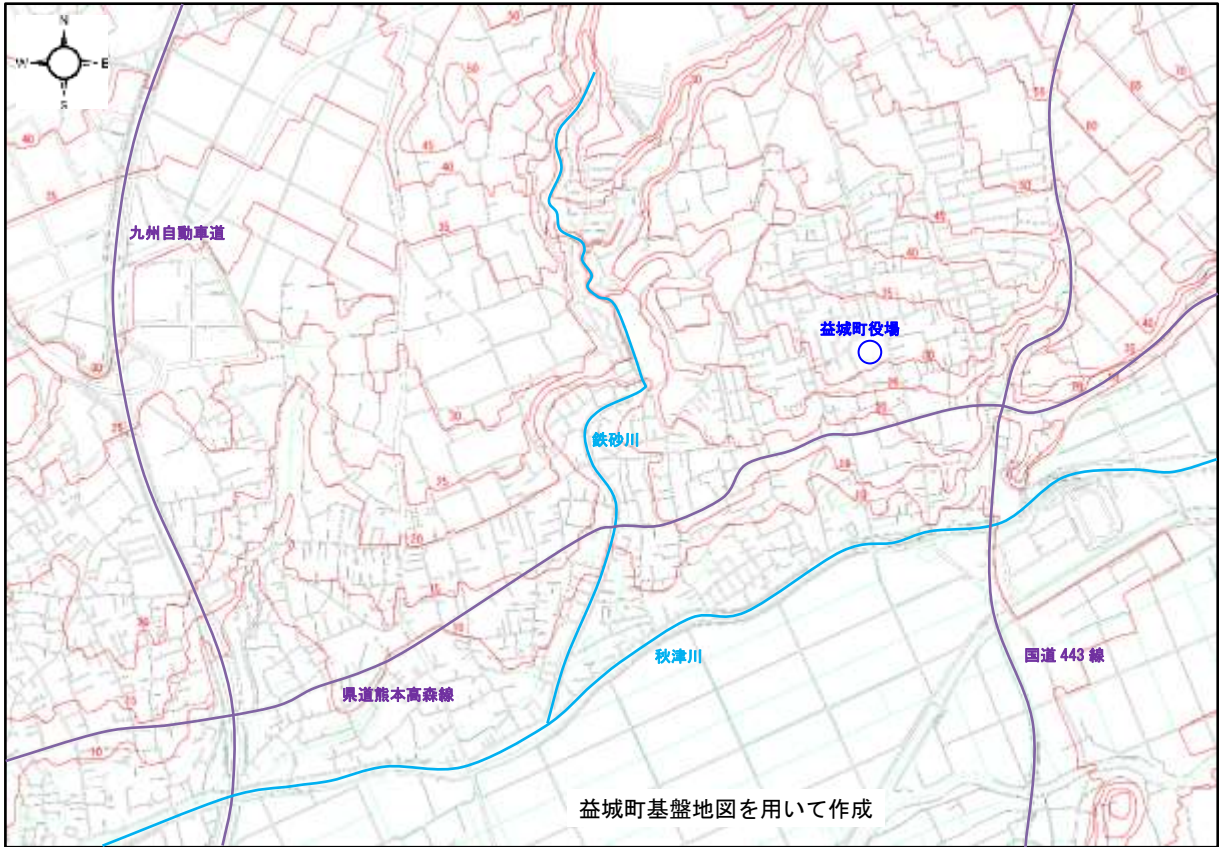


図 3-40 益城市街地の地形標高