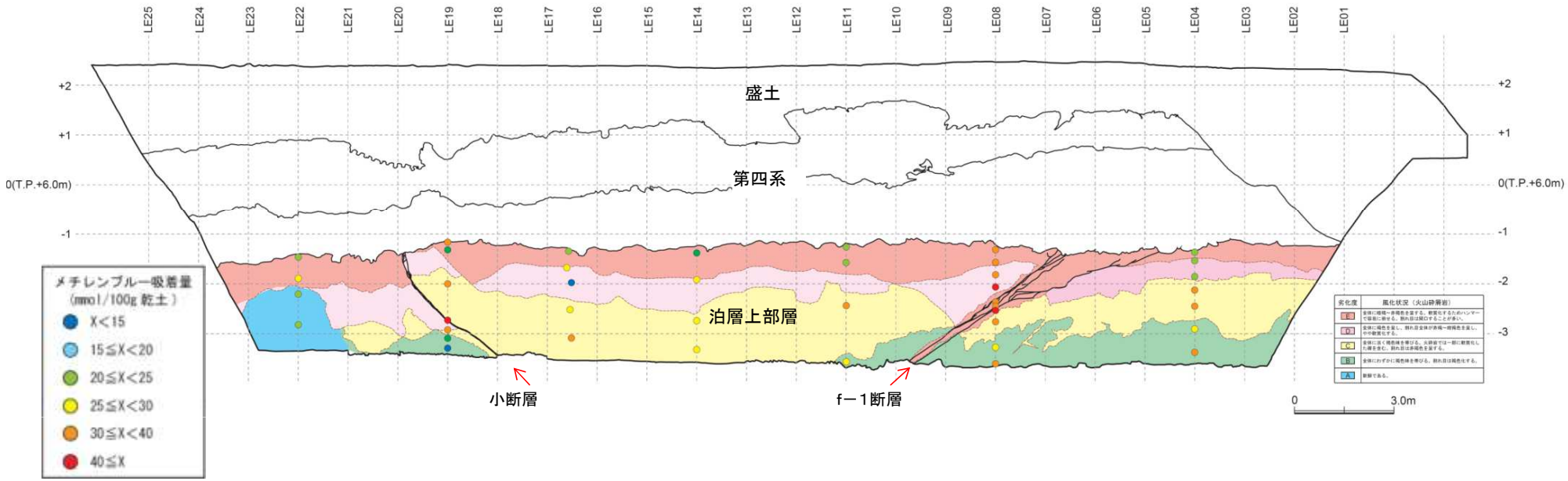
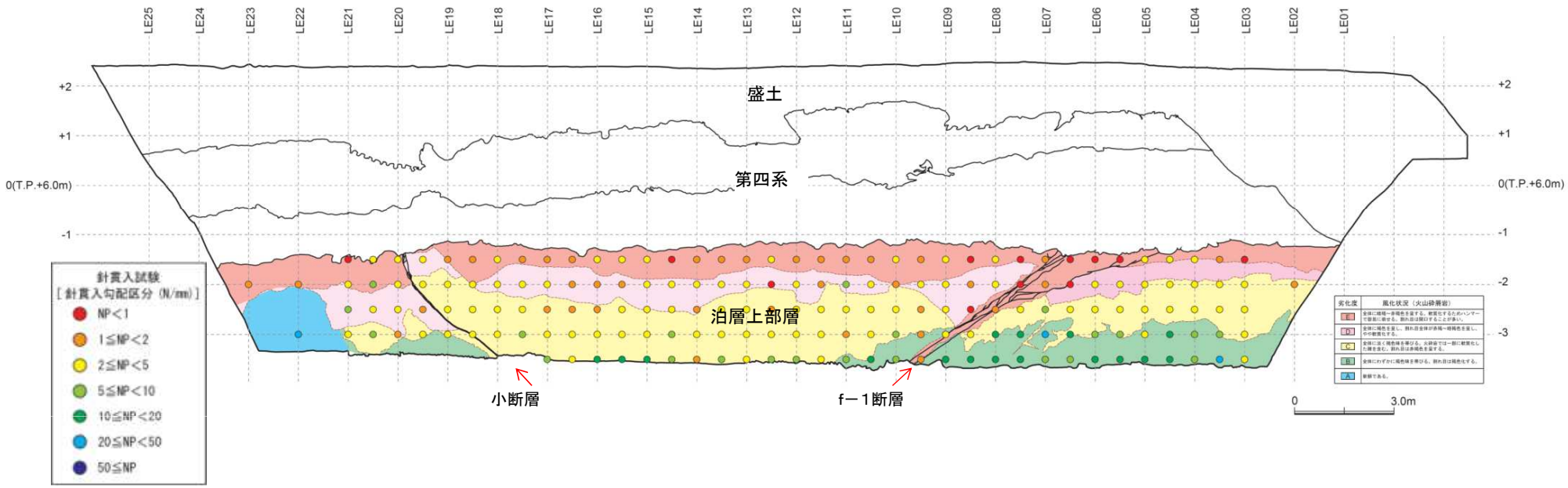
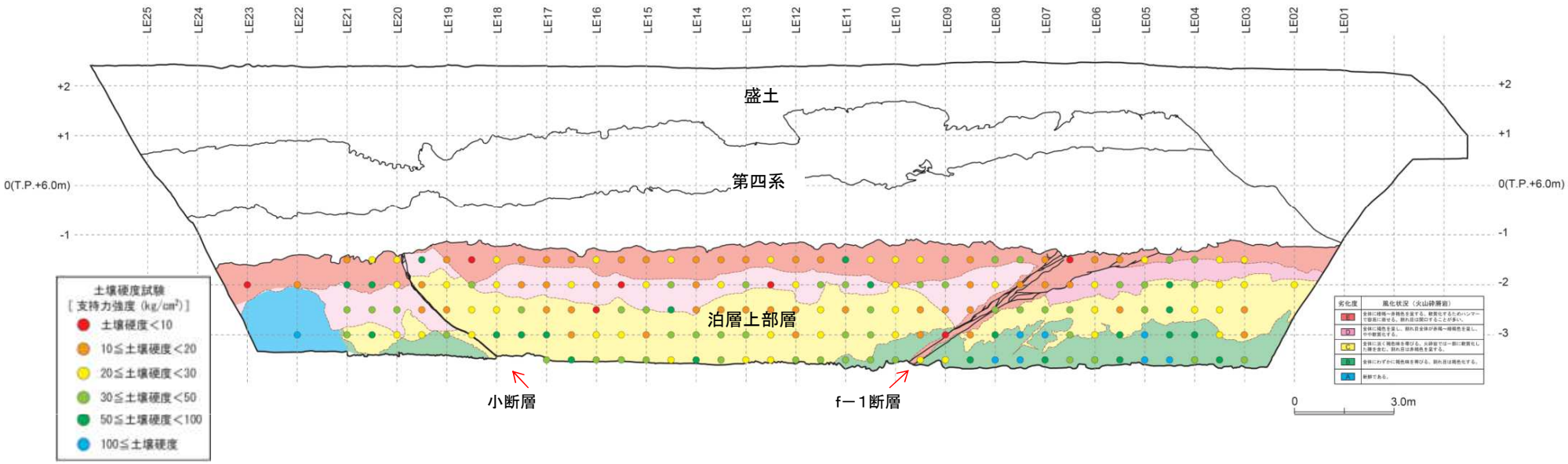


第3.2-6図(3)　理化学分析結果（Tr-34トレンチ東面，メチレンブルー吸着量試験）

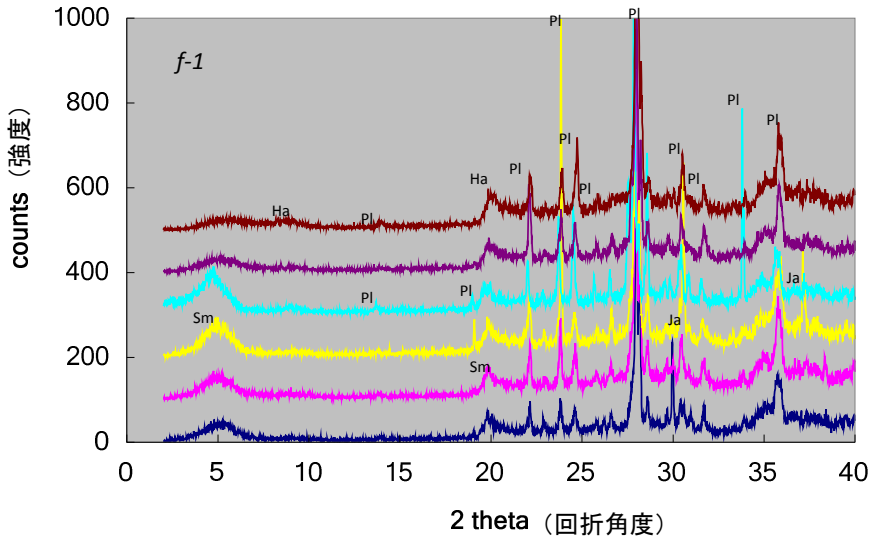


第3.2-7図(1)　物理試験結果（Tr-34トレンチ東面，針貫入試験）



第3.2-7図(2)　物理試験結果（Tr-34トレンチ東面，土壌硬度試験）

H25B-f1孔（着岩; 4.45m） Tr-34（湿潤試料）



XRD PW3050/60 (philips;現Panalysical製)
40kV-50mA, Mask 15 mm,
DS:SS:RS = Program(15): Pro(15) :0.2 mm, step 0.6(s), 2° / min

劣化度z	深度(m)
E	4.45
E	4.65
E	5.23
A	6.2
A	10.37
A	117.35

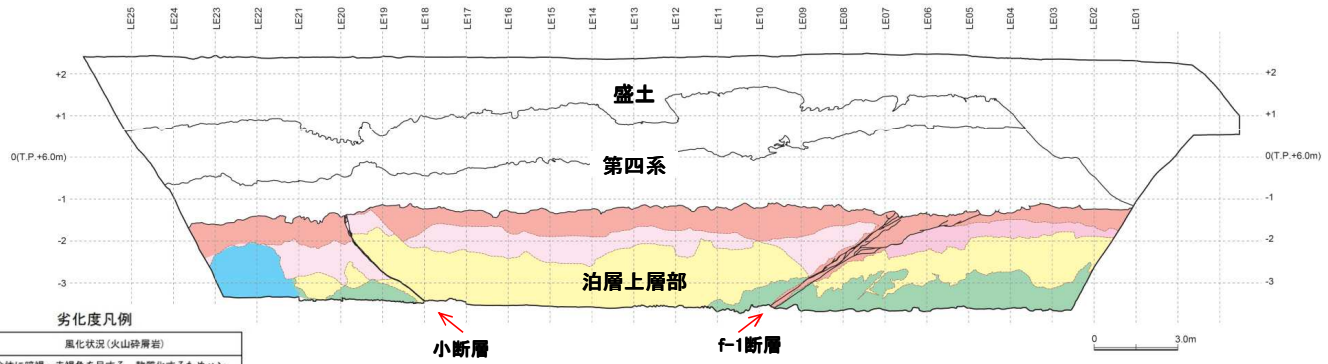
- 泊層上部層表層4.6m付近までが著しく風化し，ハロイサイトが生成している。
- 同様に斜長石も深部に比べると少ない。
- モンモリロナイトは4.6m以深から深部に増加する。

- 浅所の著しく風化した箇所にハロイサイトが生成している。
- Ca斜長石，モンモリロナイトが消失し，ハロイサイトが晶出する。

第3.2-8図　泊層上部層の凝灰角礫岩の鉱物分析結果（Tr-34トレンチ）

地質スケッチ及び解析用劣化区分図

主にf－１断層と小断層間において見られる新第三系（泊層上部層）及び第四系の緩やかな撓みを変状発生前に復元した上で，解析用劣化度区分図を作成した。
トレンチ調査に加え，Tr-34トレンチ東面付近で実施したボーリング調査も参考とした。

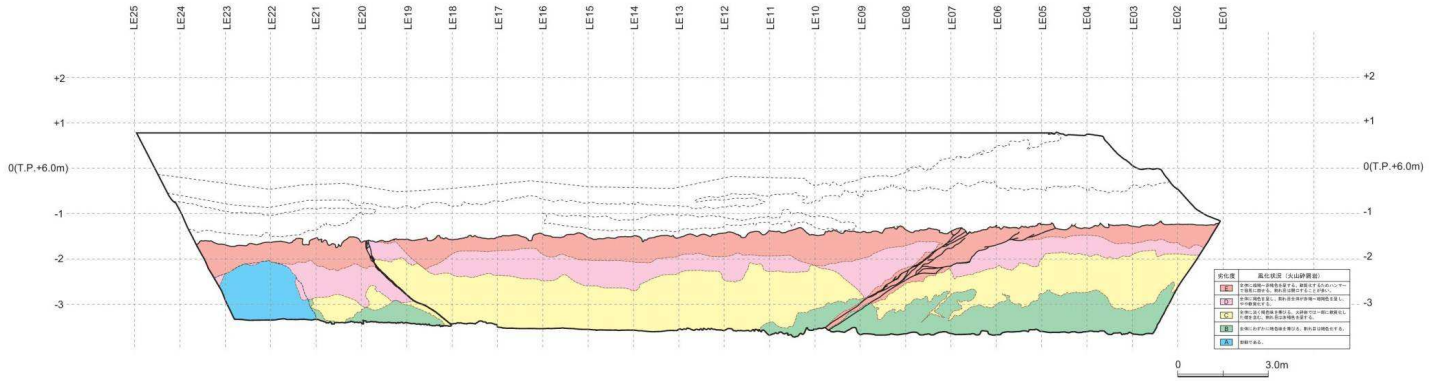


劣化度凡例

劣化度	風化状況（火山砕屑岩）
E	全体に暗褐～赤褐色を呈する。軟質化するためハンマーで容易に崩せる。割れ目は開口することが多い。
D	全体に褐色を呈し，割れ目全体が赤褐～暗褐色を呈し，やや軟質化する。
C	全体に淡く褐色味帯びる。火砕岩では一部に軟質化した線を含む。割れ目は赤褐色を呈する。
B	全体にわずかに褐色味を帯びる。割れ目は褐色化する。
A	新鮮である。

Tr-34トレンチ東面　劣化度区分図

Tr-34 トレンチ　東法面　劣化度区分（膨潤前）

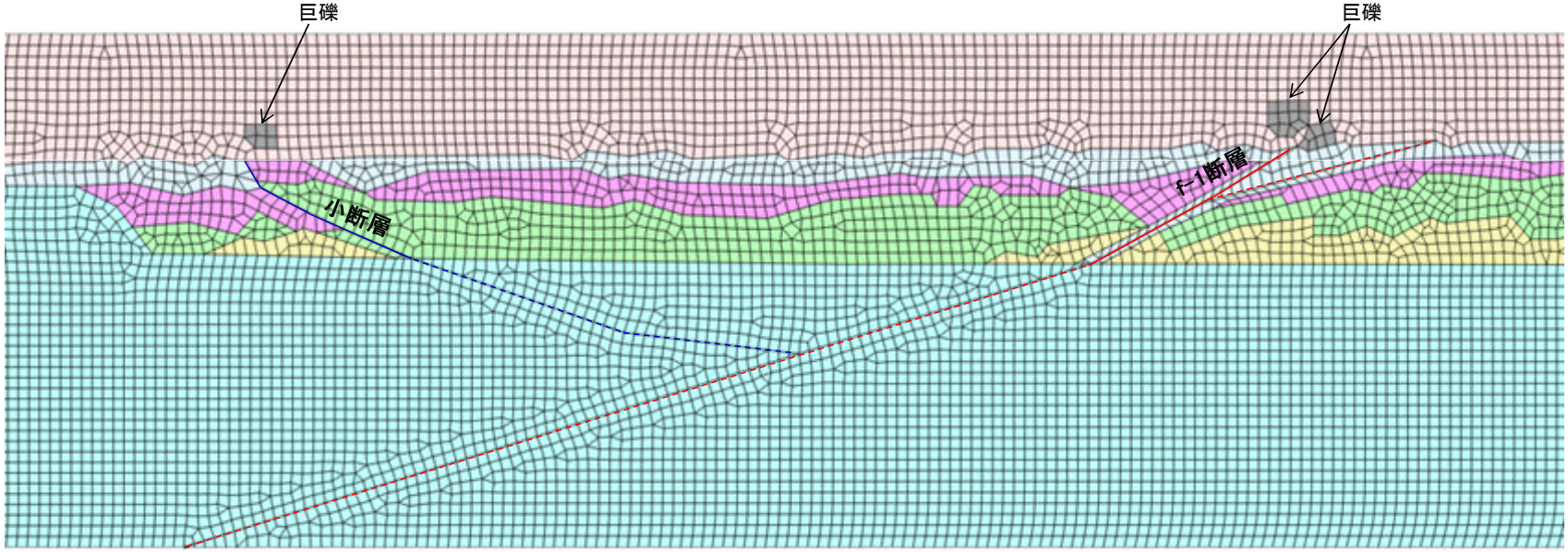


Tr-34トレンチ東面　解析用劣化度区分図
（変状発生前）

第3.2-9図(1)　第四系の変状の再現解析結果（ｆ－１断層，解析条件(1)）

解析モデル図

解析用劣化区分図及びTr-34トレンチ付近で実施したボーリング調査に基づき有限要素モデルを作成した。
新第三系及び第四系はソリッド要素，f－１断層及び小断層はジョイント要素及びソリッド要素でモデル化した。
第四系は砂層・砂礫層の最大層厚相当としてモデル化した。



Tr-34東面　解析モデル図

境界条件
・側面：　鉛直ローラー
・底面：　固定

第四系
- M2面段丘堆積層（砂・砂礫）
- 上記のうち巨礫

断層（いずれの断層も実線はジョイント要素，点線はソリッド要素でモデル化）
- 小断層
- f－１断層およびf－１断層から派生する断層

新第三系
- 劣化度E
- 劣化度D
- 劣化度C
- 劣化度B
- 劣化度A

第3.2-9図(2)　第四系の変状の再現解析結果（ｆ－１断層，解析条件(2)）

解析用物性値

不動元素(Ti)に着目した試料分析により，劣化度区分ごとの体積膨張比を設定した。

体積膨張比

		体積膨張比 εv ※1
新第三系	劣化度E	1.20
	劣化度D	1.20
	劣化度C	1.10
	劣化度B	1.00
	劣化度A	1.00

※1　不動元素(Ti)に着目した試料採取・分析結果を参考に，新鮮部(劣化度A・B)に対する比として設定。

小断層のモデル化厚さ

名称	トレンチ調査結果※2		モデル化厚さ (cm)
	挟在物	最大厚さ(cm)	
f－1断層	粘土	0.6	0.6
小断層	粘土	1.2	1.2

※2　Tr-34トレンチ東面において確認された最大厚さを記載

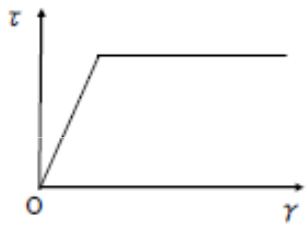
解析用物性値

土質・劣化度区分		物理特性	変形特性※3		強度特性※4	
		密度 ρ (g/cm^3)	変形係数 E (N/mm^2)	ポアソン比 ν	せん断強度 $\tau 0$ (N/mm^2)	内部摩擦角 Φ (°)
第四系※3	砂・砂礫	1.80 ※3	5 ※3	0.35 ※3	0.06 ※5	3.0 ※5
新第三系	劣化度E	1.56 ※5	1050 ※4	0.30 ※3	0.43 ※5	56.0 ※5
	劣化度D					
	劣化度C	2.11 ※5				
	劣化度B					
	劣化度A	2.36 ※5				
f－1断層	－	－	23 ※4	0.35 ※3	0.00 ※5	56.0 ※5
小断層	－	－	24 ※4			

※3　第四系の物理特性，変形特性は慣用値を設定(砂N値＝8相当)。巨礫は第三系(劣化度A)相当として設定。
※4　新第三系及びf－1断層・小断層の変形係数は，劣化度Aの針貫入勾配から換算。ポアソン比は慣用値を設定。
※5　強度は原子炉設置許可時の値を利用。第四系は表土，新第三系及びf－1断層・小断層は凝灰角礫岩(ガラス質)。

構成モデル

モールクーロン
バイリニア型
非線形弾性モデル



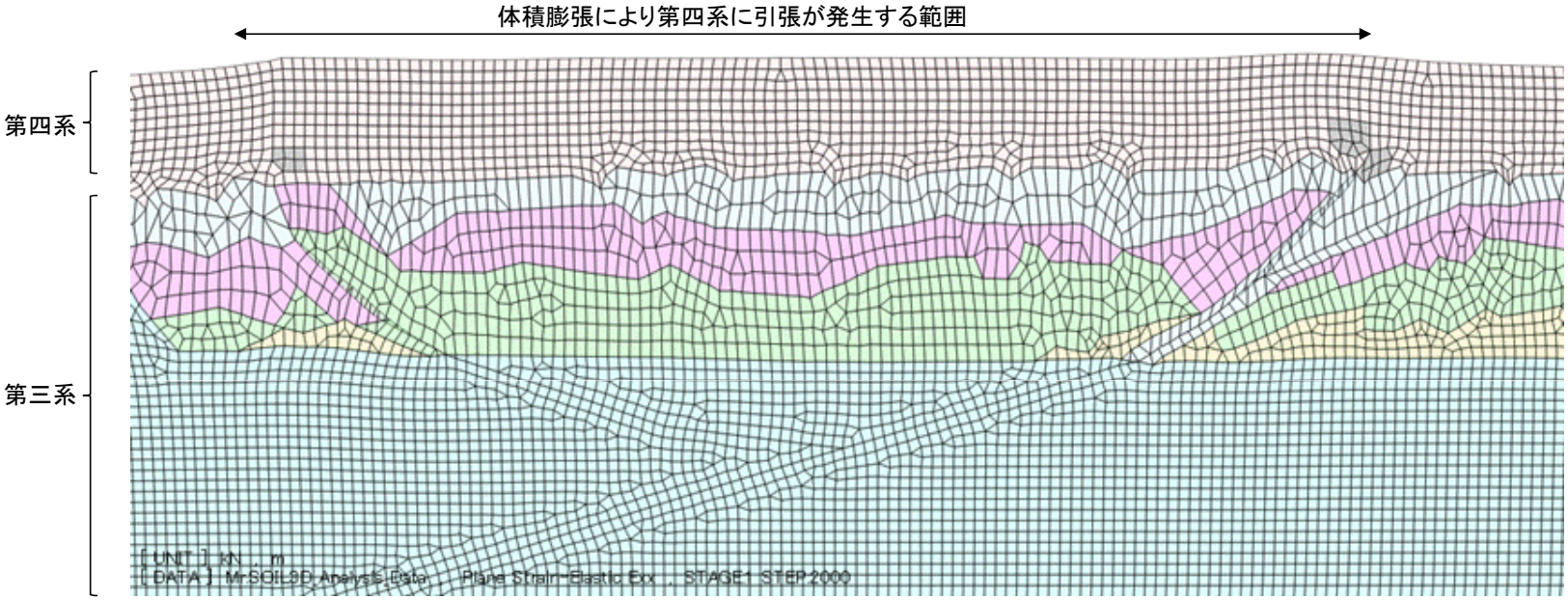
第3.2-9図(3)　第四系の変状の再現解析結果（ｆ－１断層，解析条件(3)）

解析結果（変形図）【速報】

- 第四系の変状が岩盤劣化部の体積膨張によって発生する可能性を検討する目的で，二次元静的非線形有限要素法解析を実施した。

- f－１断層及び小断層に概ね囲まれた新第三系の比較的劣化程度の大きい領域に対応した幅広い緩やかな撓み形状が概ね再現された。

- なお，解析より得られた岩盤上面における高低差は，撓みの中心付近と端部で最大約20cm程度であった。
  →敷地内の泊層凝灰角礫岩から測定された体積膨張比を用いたことにより，実際の変形量（岩盤上面における高低差：最大約20～30cm程度）と概ね整合する結果が得られた。

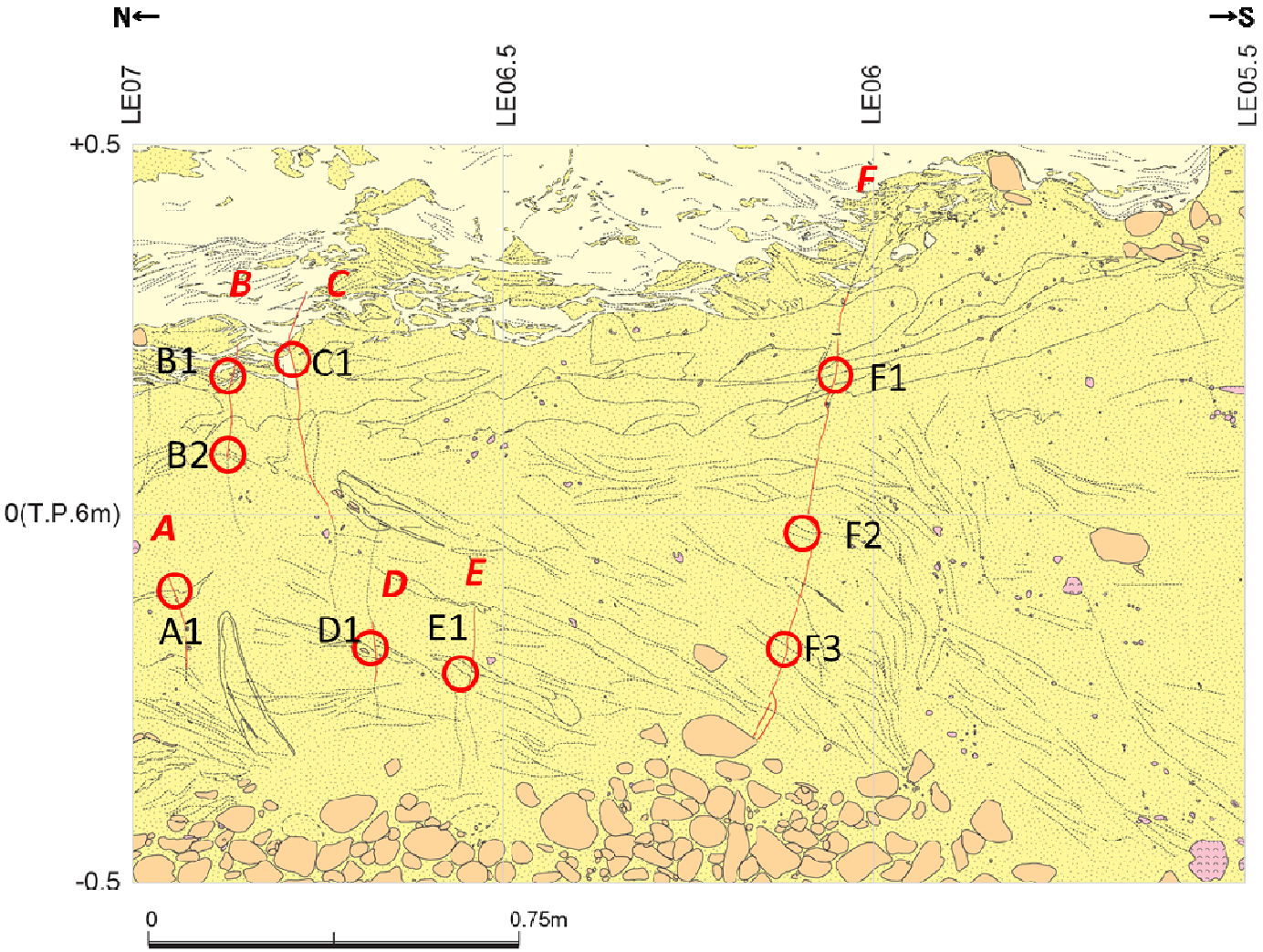


（変形倍率×５）

Tr-34東面　変形図

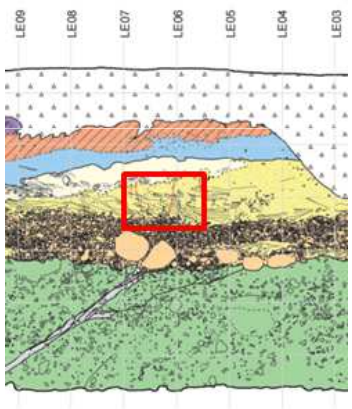
※速報であり，巨礫や初期地形の設定，断層のモデル化の精度等の影響について，引き続き検証を進めていく必要がある。

第3.2-9図(4)　第四系の変状の再現解析結果（ｆ－１断層，解析結果(1)）



断裂名	地点名	変位量	種類	変位基準
A	A1	20	-	褐色砂
B	B1	5	開口断裂	シルト
	B2	0	-	砂層中葉理
C	C1	50	開口断裂	シルト
D	D1	10	-	黒色砂
E	E1	15	-	褐色砂
F	F1	30	開口断裂	褐鉄バンド
	F2	10	開口断裂	砂層中葉理
	F3	0	開口断裂	黒色砂

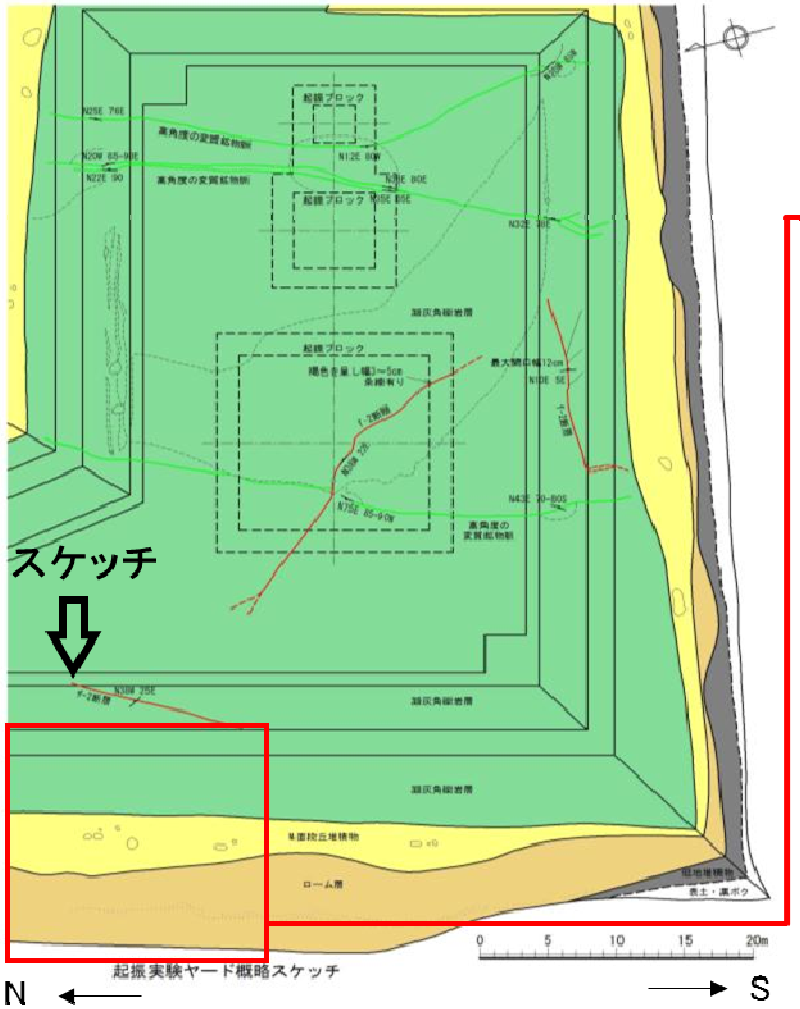
スケッチ位置



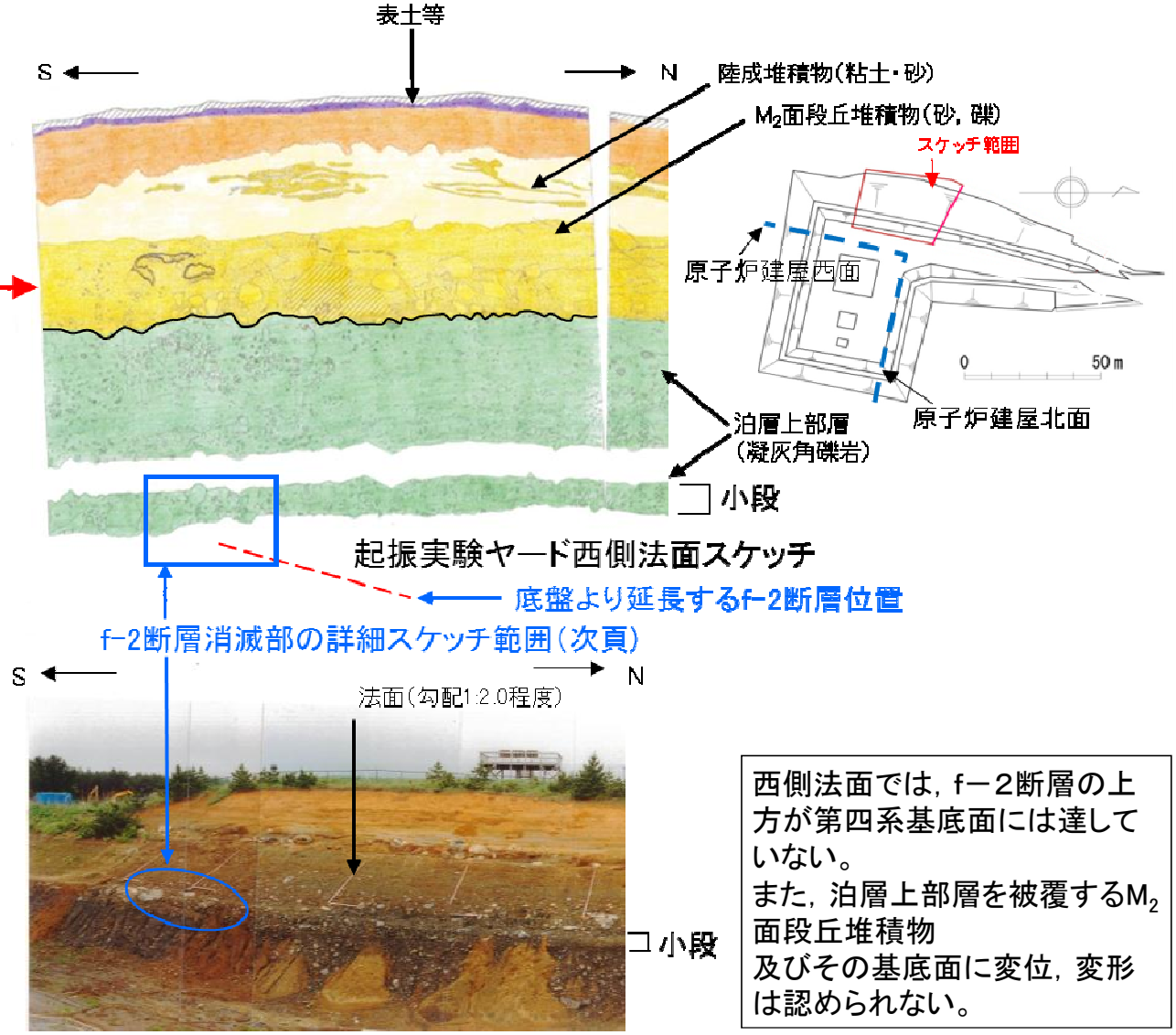
・上部：最小5mm～最大50mmの変位
・下部：最小10mm～最大20mmの変位
・すべて正断層系列

f－1断層上方の砂層に確認された第四系変状の変位量は上方ほど大きい。
⇒解析結果（第四系は変状発生位置も含め広範囲に引張応力が発生）と整合的

第3.2-10図　f－1断層上部の小断裂の変位量



※凡例は次頁参照

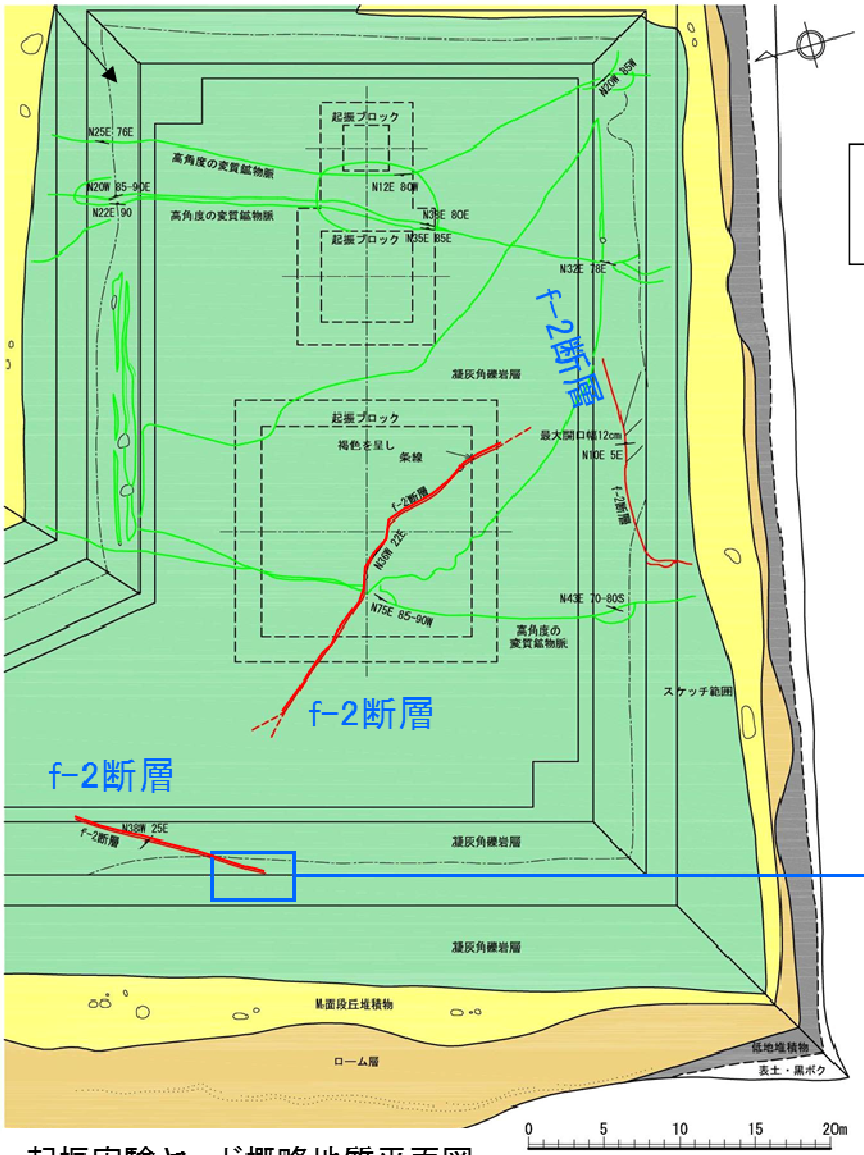


起振実験ヤード西側法面写真

西側法面では，f－2断層の上方が第四系基底面には達していない。
また，泊層上部層を被覆するM_2面段丘堆積物
及びその基底面に変位，変形は認められない。

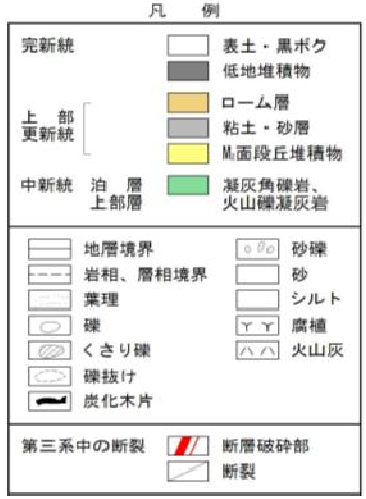
第3.2-11図(1)　ｆ－２断層の既往調査結果(原子炉設置許可申請時(1))

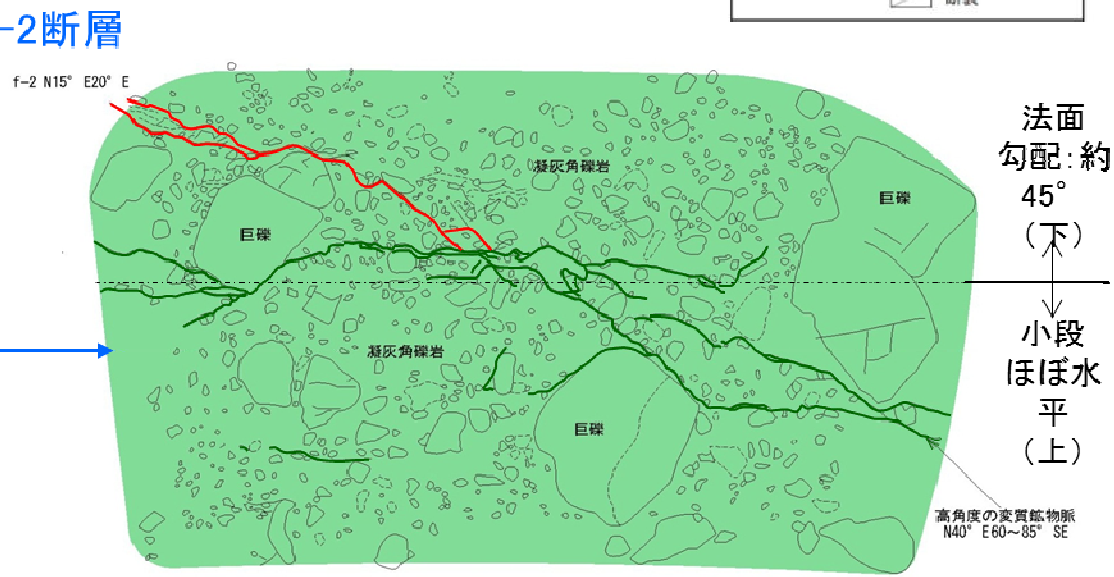
原子炉建屋北面



起振実験ヤード概略地質平面図

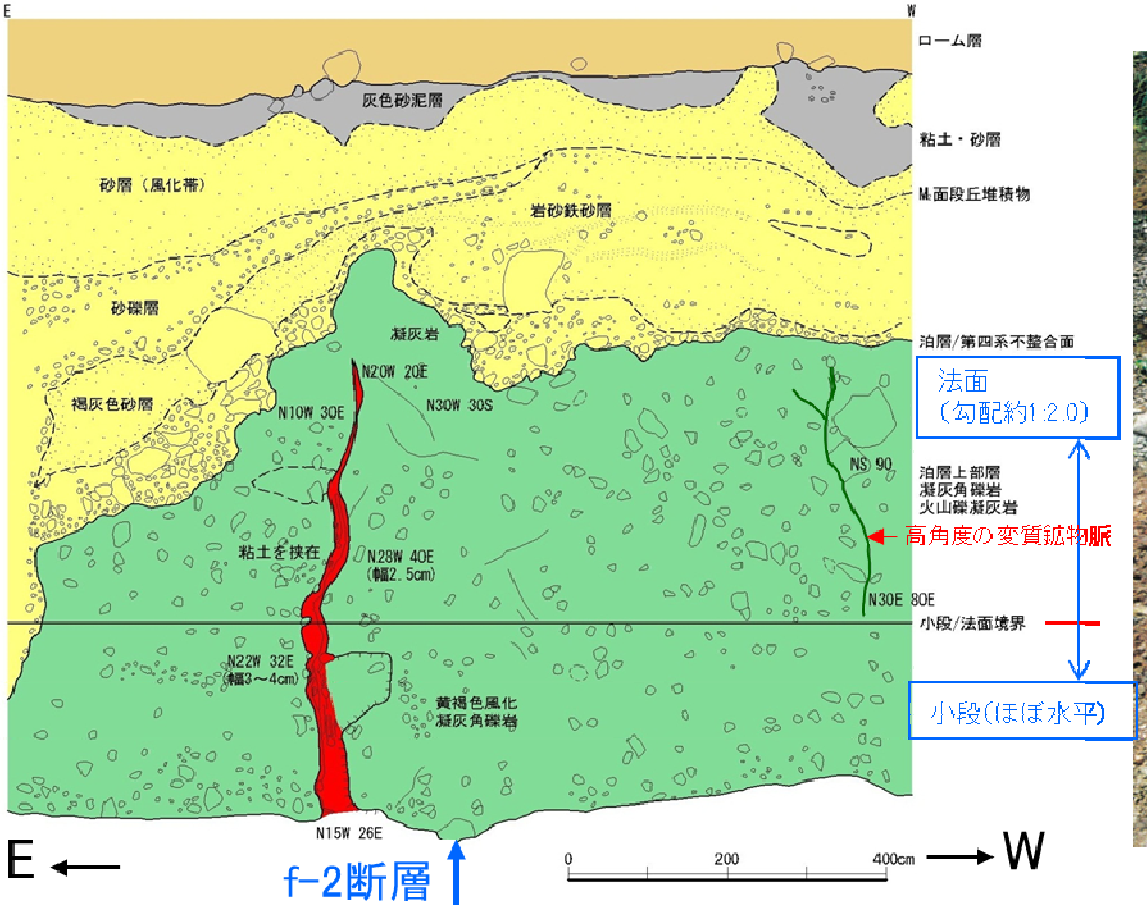
西側法面のf－2断層は，小段付近の高角度の変質鉱物脈との会合部で消滅している。

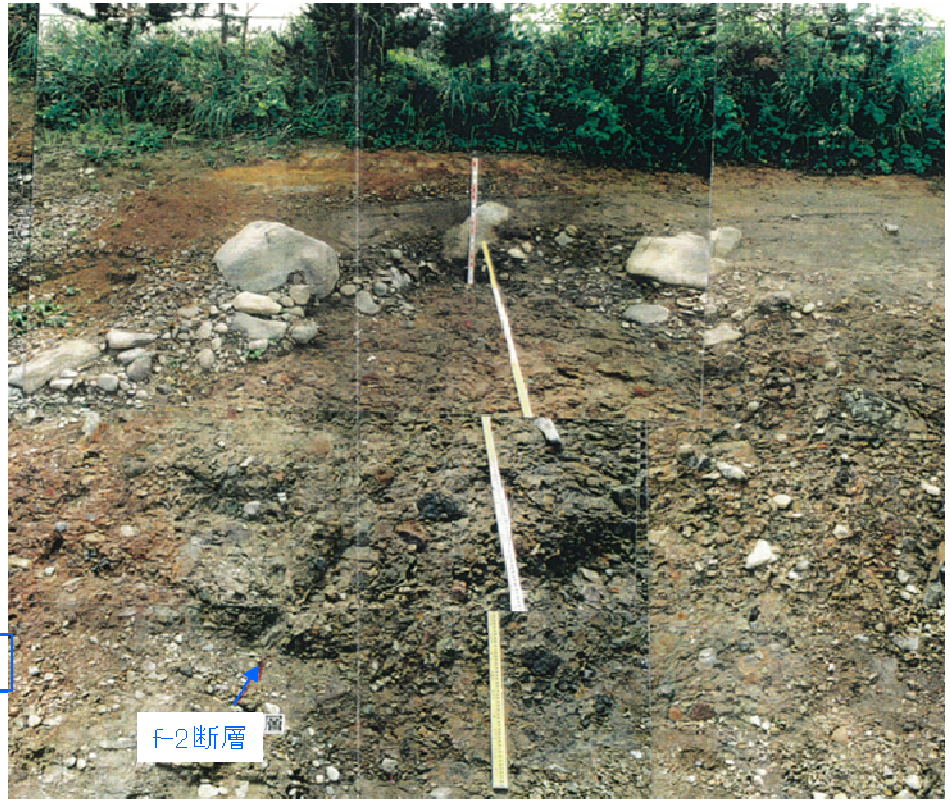




f-2断層消滅部の詳細スケッチ
（起振実験ヤード西側の小段，下法面）

第3.2-11図(2)　ｆ－２断層の既往調査結果（原子炉設置許可申請時(2)）





f-2断層写真

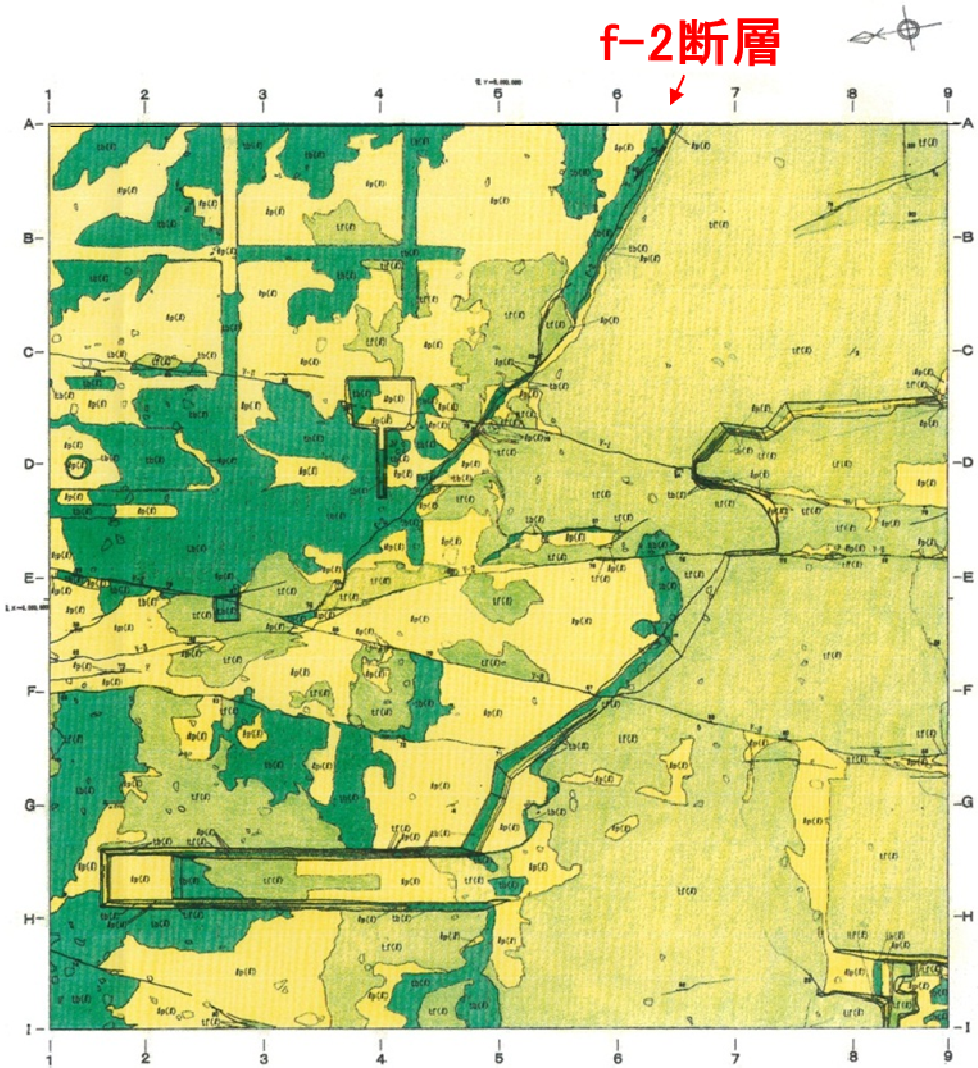
起振実験ヤード南側法面f-2断層詳細スケッチ

・本スケッチは、ほぼ水平な小段と傾斜した法面を展開したもの

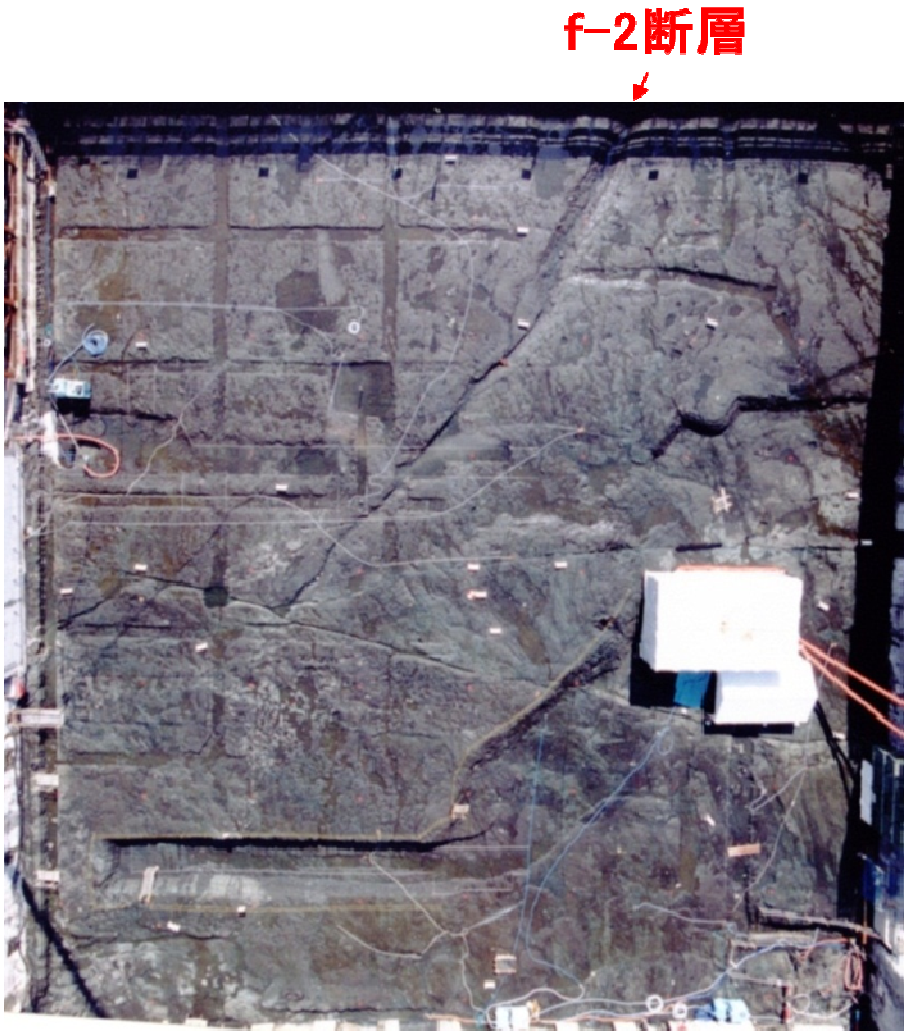
起振実験ヤード南側法面スケッチ位置図

起振実験ヤード南側法面に分布するf－2断層は，その上方延長部が，第四系基底面まで達していない。また，これを被覆するM_2面段丘堆積物及びその基底面に変位，変形を与えていない。
なお，f－2断層西側の高角度の変質鉱物脈は，泊層上部層中で消滅している。また，これを被覆する第四系に変位，変形を与えていない。

第3.2-11図(3)　ｆ－２断層の既往調査結果（原子炉建屋設置許可申請時(3)）



原子炉設置基盤面の岩盤分類図

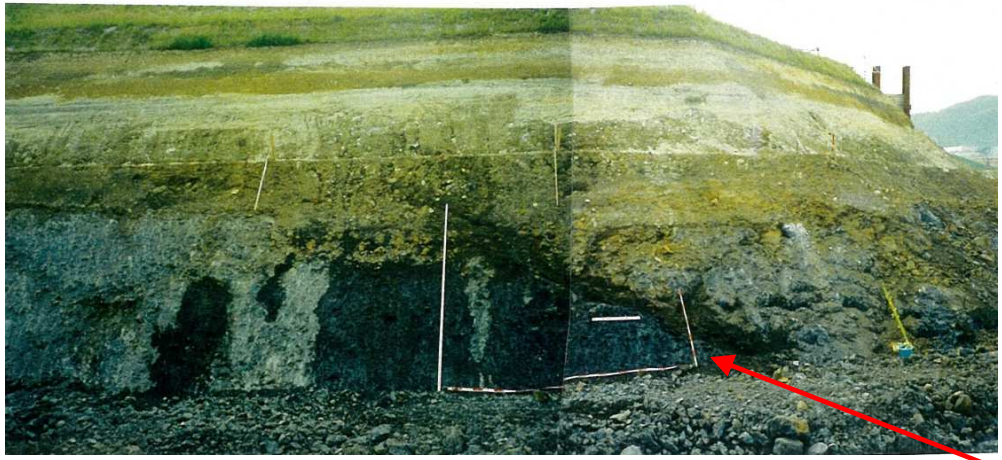


原子炉設置基盤面の写真

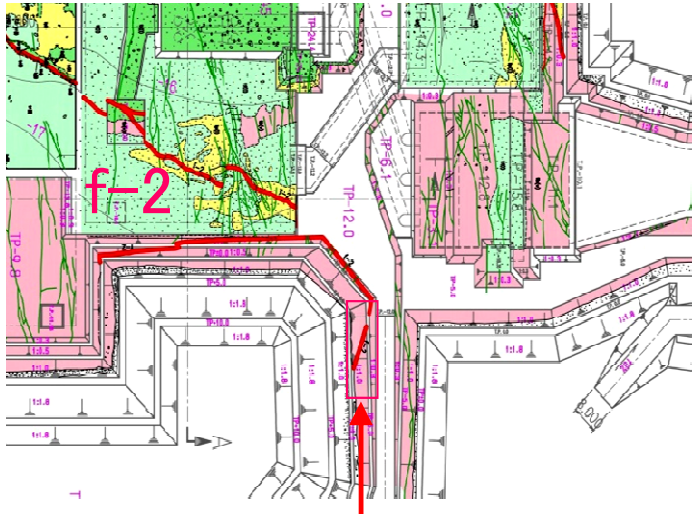
f－2断層位置図（基礎岩盤の掘削時）

f-2断層は北西側でV-2に接し，これを超えては分布しない。

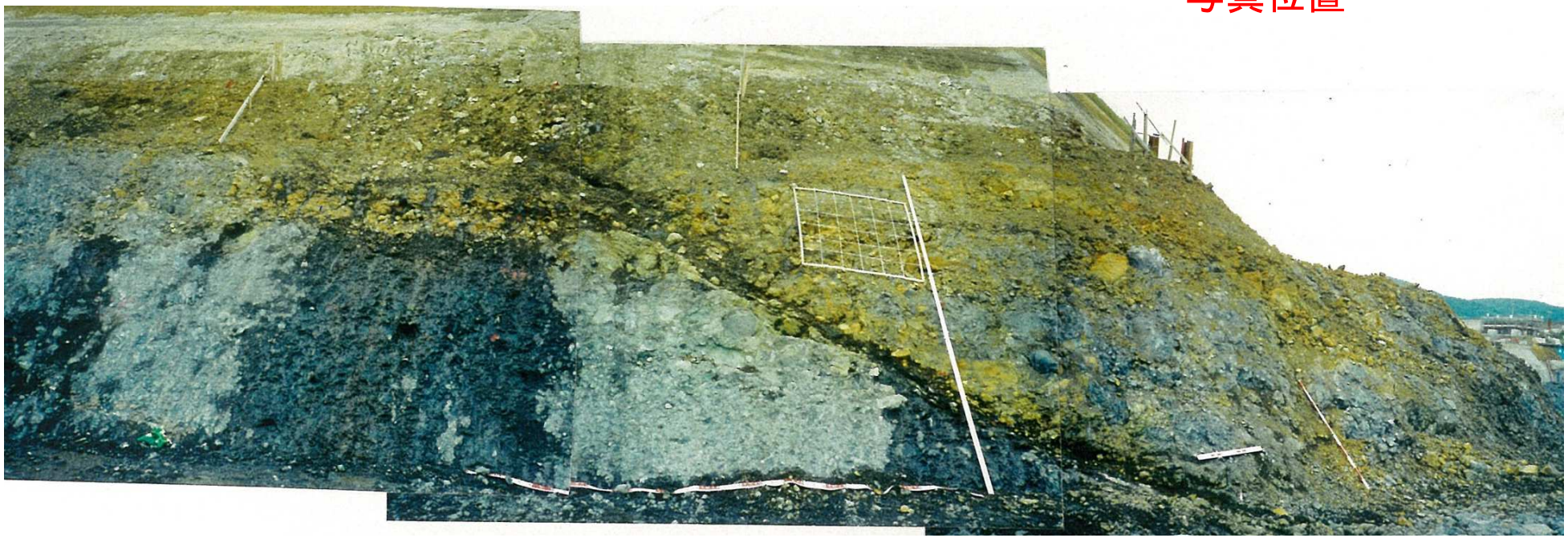
第3.2-12図(1)　ｆ－２断層の既往調査結果（建設時(1)）



f-2断層



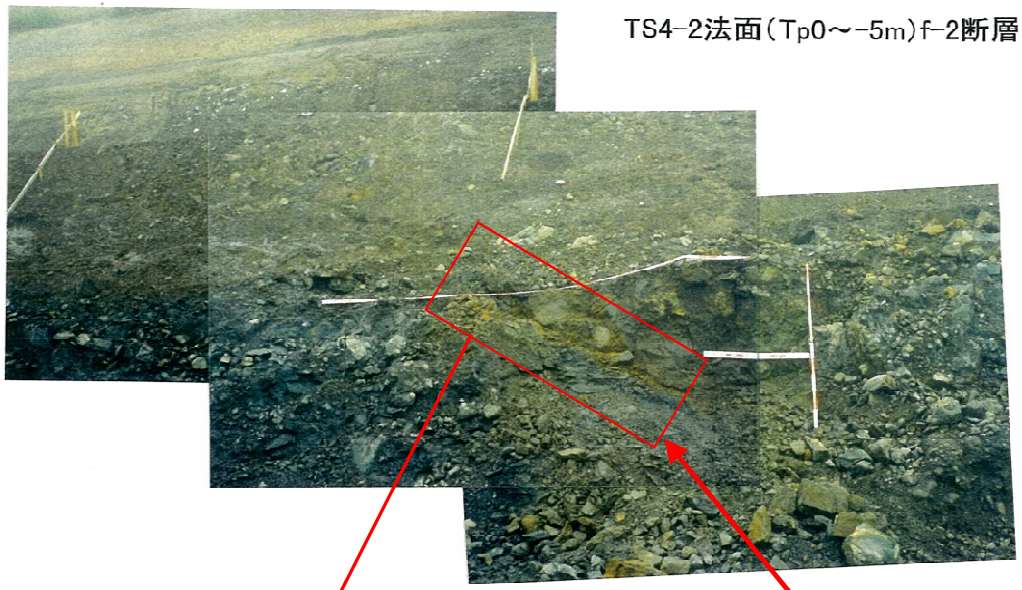
写真位置

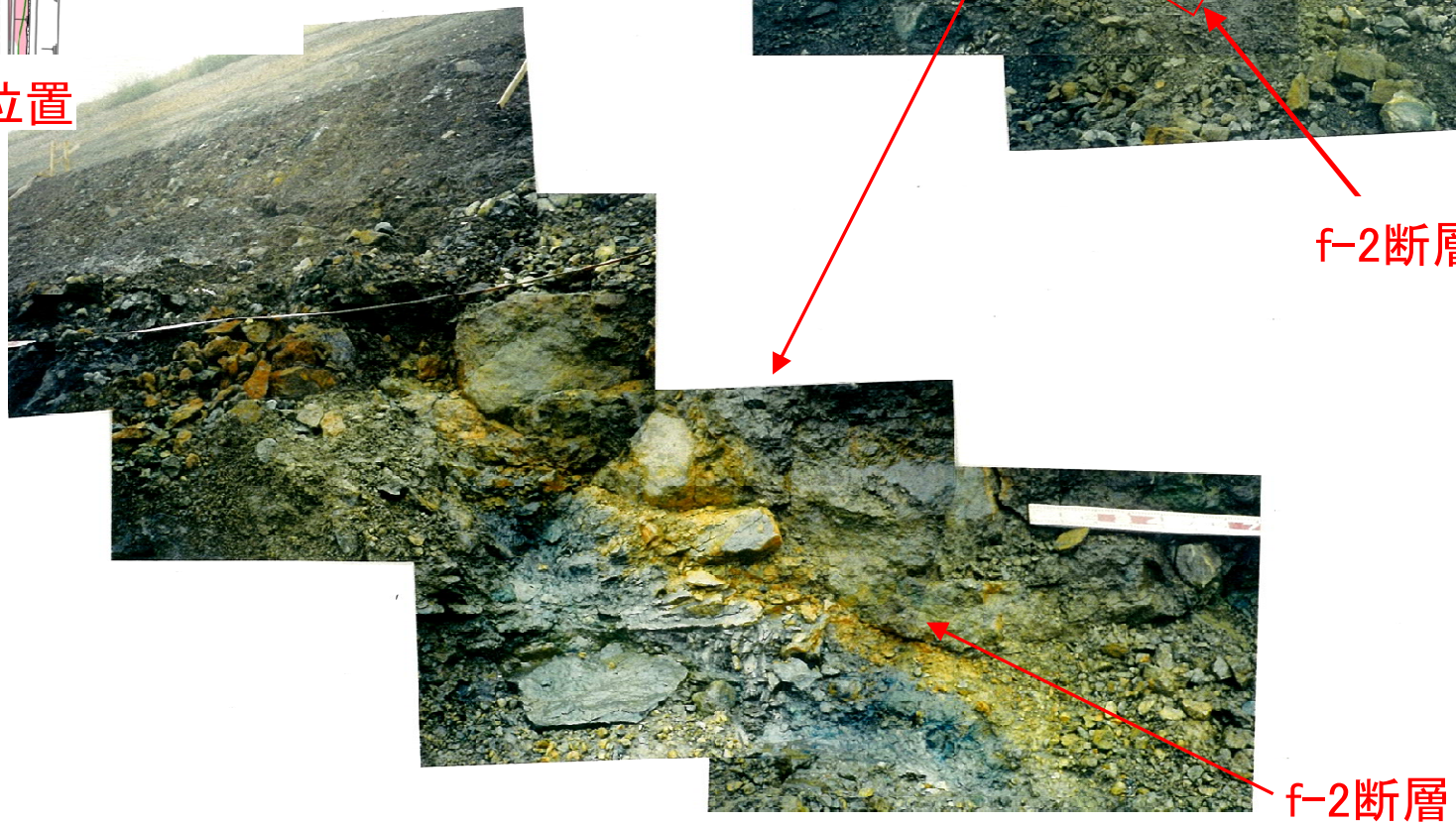


f-2断層

f-2断層確認箇所(タービン建屋南側)(1)

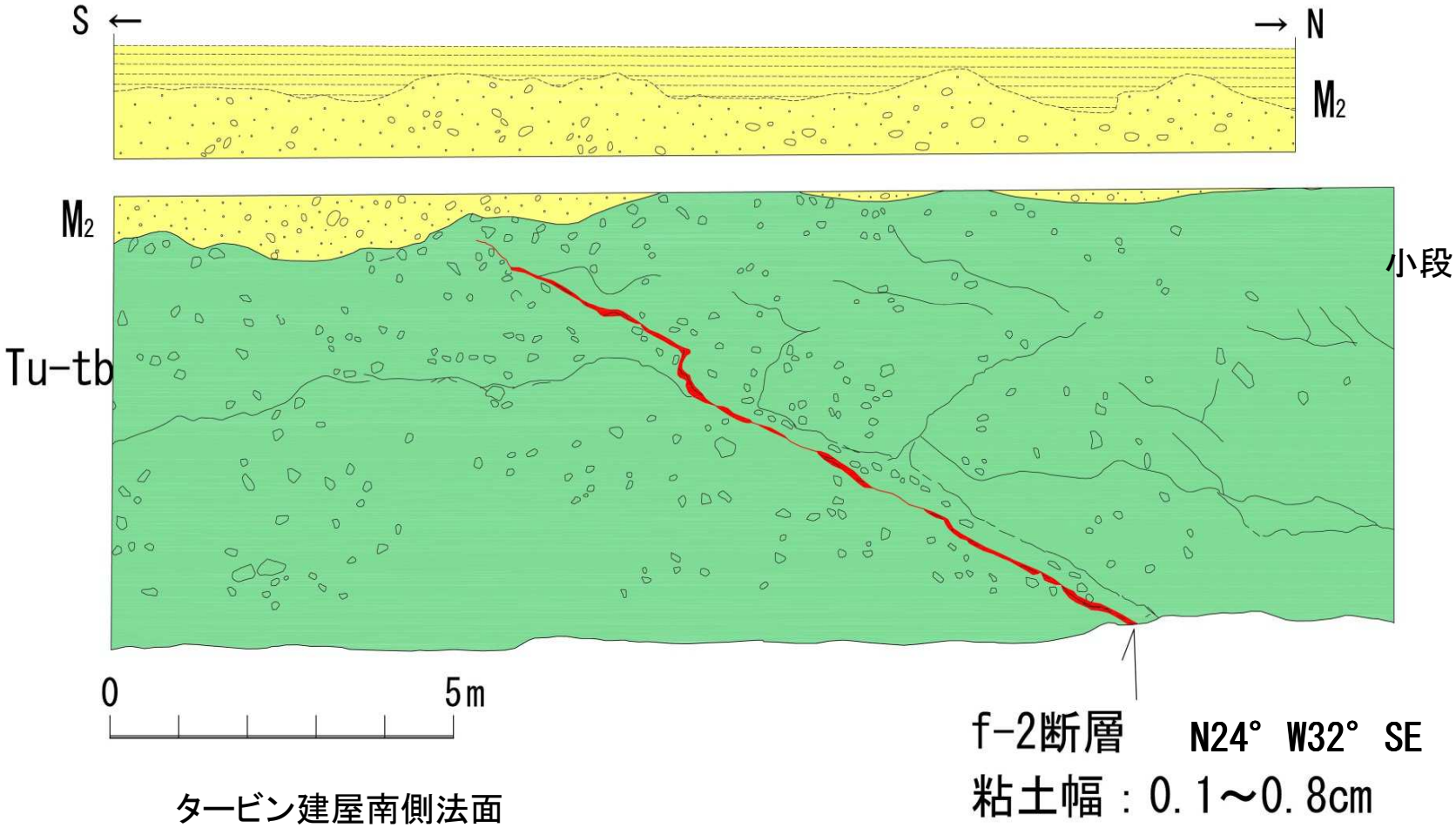
第3.2-12図(2)　ｆ－２断層の既往調査結果(建設時(2))





f－2断層確認箇所(タービン建屋南側)(2)

第3.2-12図(3)　ｆ－２断層の既往調査結果(建設時(3))



f－２断層詳細スケッチ（タービン建屋南側）

タービン建屋南側法面ではf－２断層の上方が第四系基底面まで達しておらず，第四系に変位・変形は認められない。

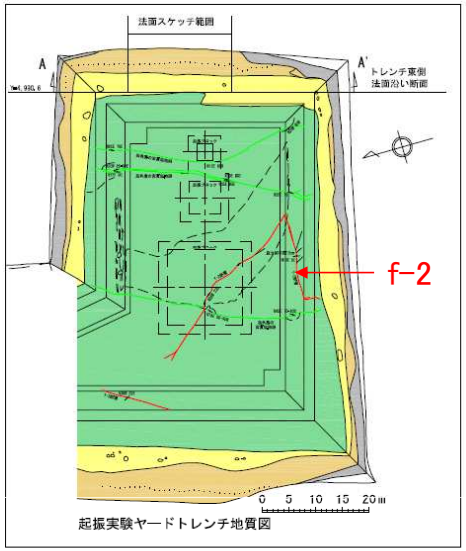
第3.2-12図(4)　ｆ－２断層の既往調査結果（建設時(4)）

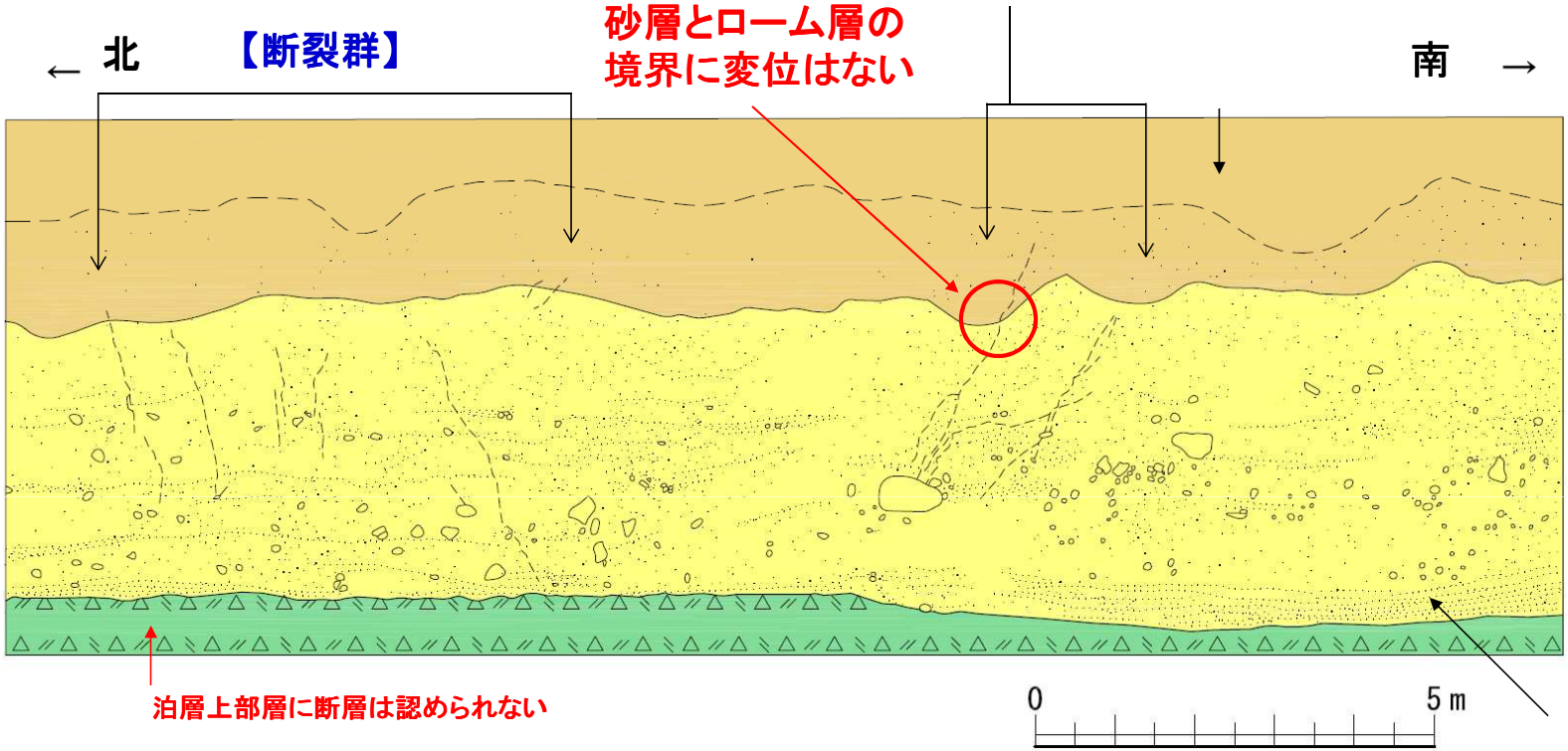
掘削断面の高低差等の不連続によりf-1，f-2断層が不連続に表記されている。

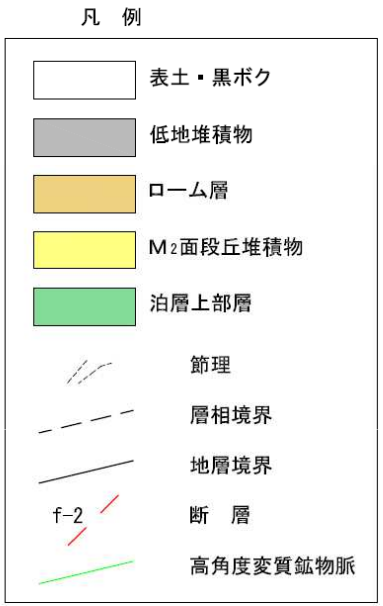
概ね申請時の調査結果どおりの位置にf－１断層，f－２断層が確認された。

第3.2-12図(5)　ｆ－２断層の既往調査結果（建設時(5)）

東側法面写真

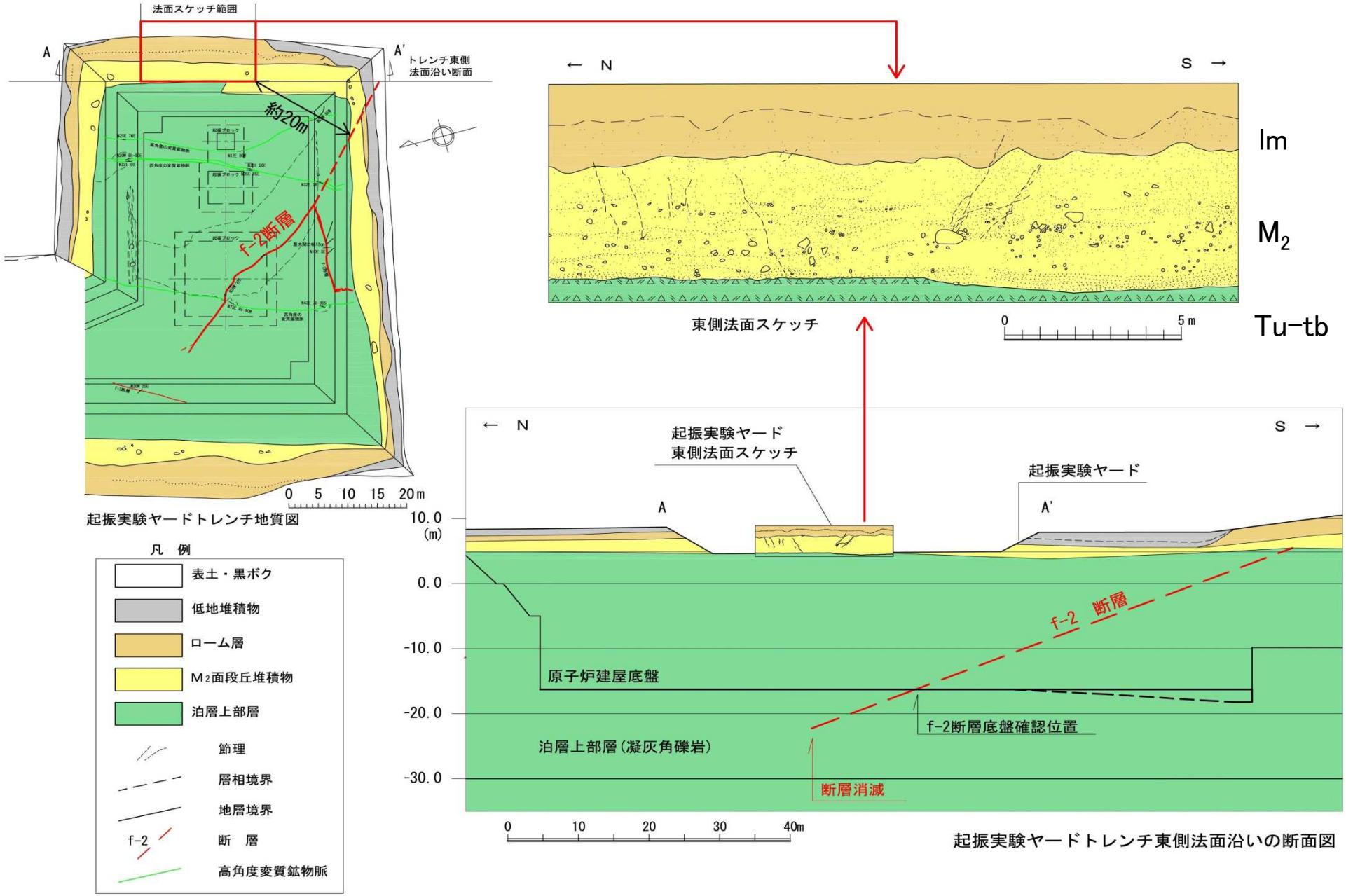






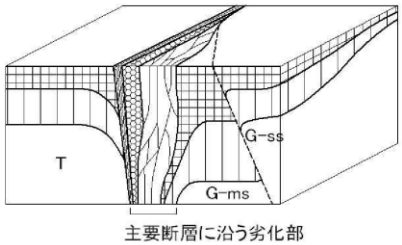
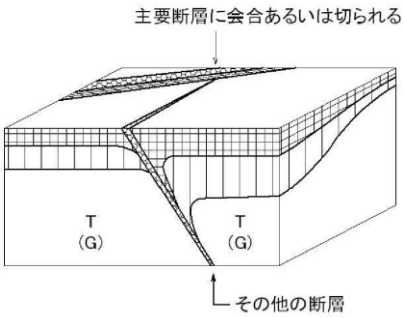
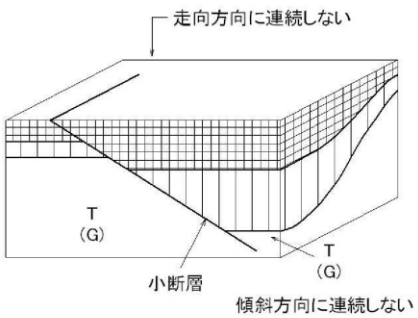
起振実験ヤードトレンチ東側法面写真・スケッチ

第3.2-13図(1)　ｆ－２断層上盤の変位のない断裂群(1)



f－2断層はT.P.-20m付近で消滅している。

第3.2-13図(2)　ｆ－２断層上盤の変位のない断裂群(2)

断層の区分	劣化帯の分布		劣化帯の性状	劣化帯の模式図
	断層に沿う劣化帯	表層部の風化による劣化帯		
主要断層	・高角度（70～80°）で傾斜する。 ・破砕幅は 20～570cm と広い。 ・深部方向への連続性は、100m以深まで劣化部が連続する。なお深部で上、下盤が同一地層となる部分では破砕幅が数 cm～28cm と狭くなる。 ・地表付近は風化の影響で深部に比較し幅が広い。	・表層付近の風化は、断層上盤側の蒲野沢層側で幅が広く、深部まで及んでいる。 ・断層破砕部に沿って深部まで軟質化する。 ・断層破砕部上盤に分布することの多い蒲野沢層の泥岩、礫岩、蒲野沢層堆積前の泊層の風化部等の軟質岩が他の岩種に比較して深部まで風化する。	・断層に沿って、モンモリロナイト、セピオライト等の吸水膨張する粘土鉱物からなる粘土状帯・葉片状帯などの著しい劣化部(幅 15～150 cm)が分布する。 ・粘土状～葉片状帯の上盤側に細片状～割れ目密集部が分布する。	
その他の断層	・低角～高角度と傾斜は様々である。 ・幅はフィルム状～57cm と概して狭い。 ・傾斜方向及び走向方向の延長部は、主要断層に会合もしくは切られている為、比較的連続性に乏しい。	・表層付近の風化は、断層上盤側で厚い傾向がある。 ・断層に沿う風化は、比較的浅部に限られ、幅が狭い。	・断層に沿うモンモリロナイト、セピオライトよりなる粘土状帯、葉片状帯はフィルム状～10cm である。 ・風化による劣化部は全体に軟質化し、割れ目が多く発達する。 ・風化による劣化部にはシーティング節理が発達することが多い。 ・風化による劣化の著しい部分は褐色に汚染される。	
小断層	・低角～中角度（30°～50°）で傾斜する。 ・幅は 5cm 以下と狭い。 ・深部方向への延長は、断層自体が数 m～数 10mであることから、劣化部もこの範囲で尖滅する。 ・走向方向の連続は、数 10mであり、連続性に乏しい。	・表層付近の風化は、断層上盤側で厚い傾向がある。 ・断層自体に沿う風化は浅部に限られ幅が狭い。	・断層に沿う劣化部はフィルム状～4cm であり、主にモンモリロナイトよりなる。 ・風化による劣化部は、全体に軟質化し、開口した割れ目が多く発達する。 ・シーティング節理が発達することがある。 ・風化による劣化の著しい部分は褐色に汚染される。	

凡　例

- 強風化による劣化帯
- 弱風化による劣化帯
- 粘土状～葉片状部
- 細片状部
- 割れ目密集部
- 非劣化部

T: 泊層(凝灰角礫岩、溶岩)

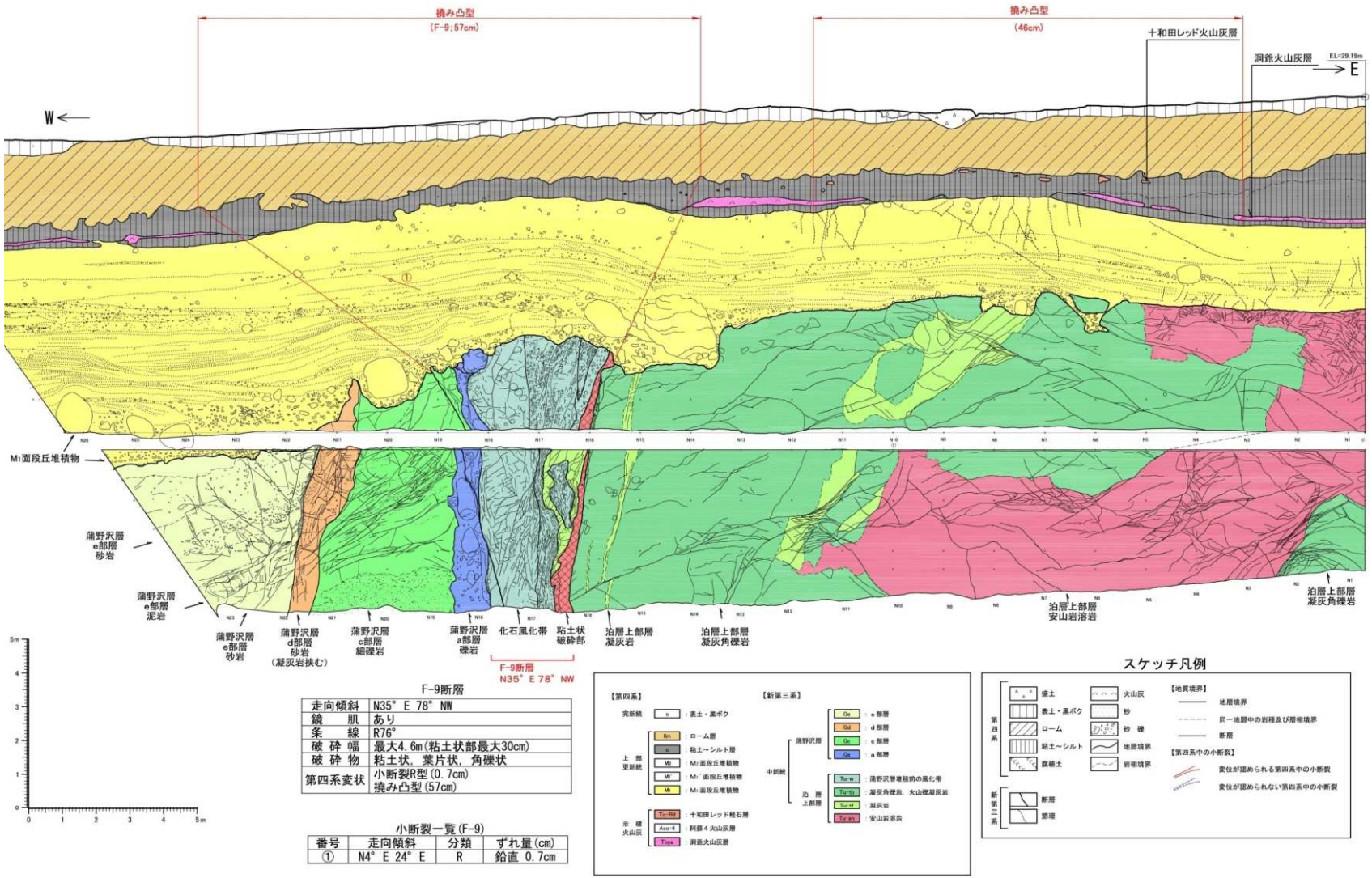
G: 蒲野沢層

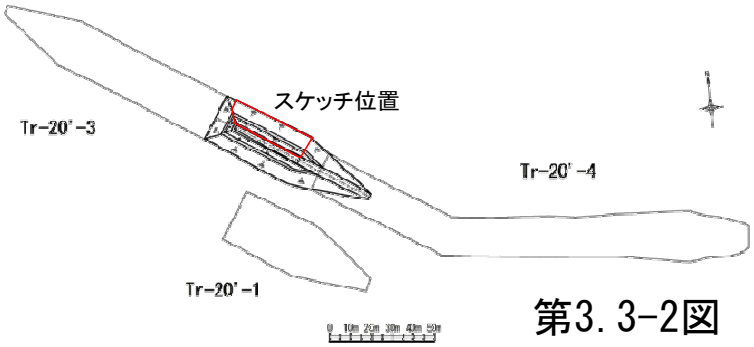
G-ss: 蒲野沢層(砂岩)

G-ms: 蒲野沢層(泥岩)

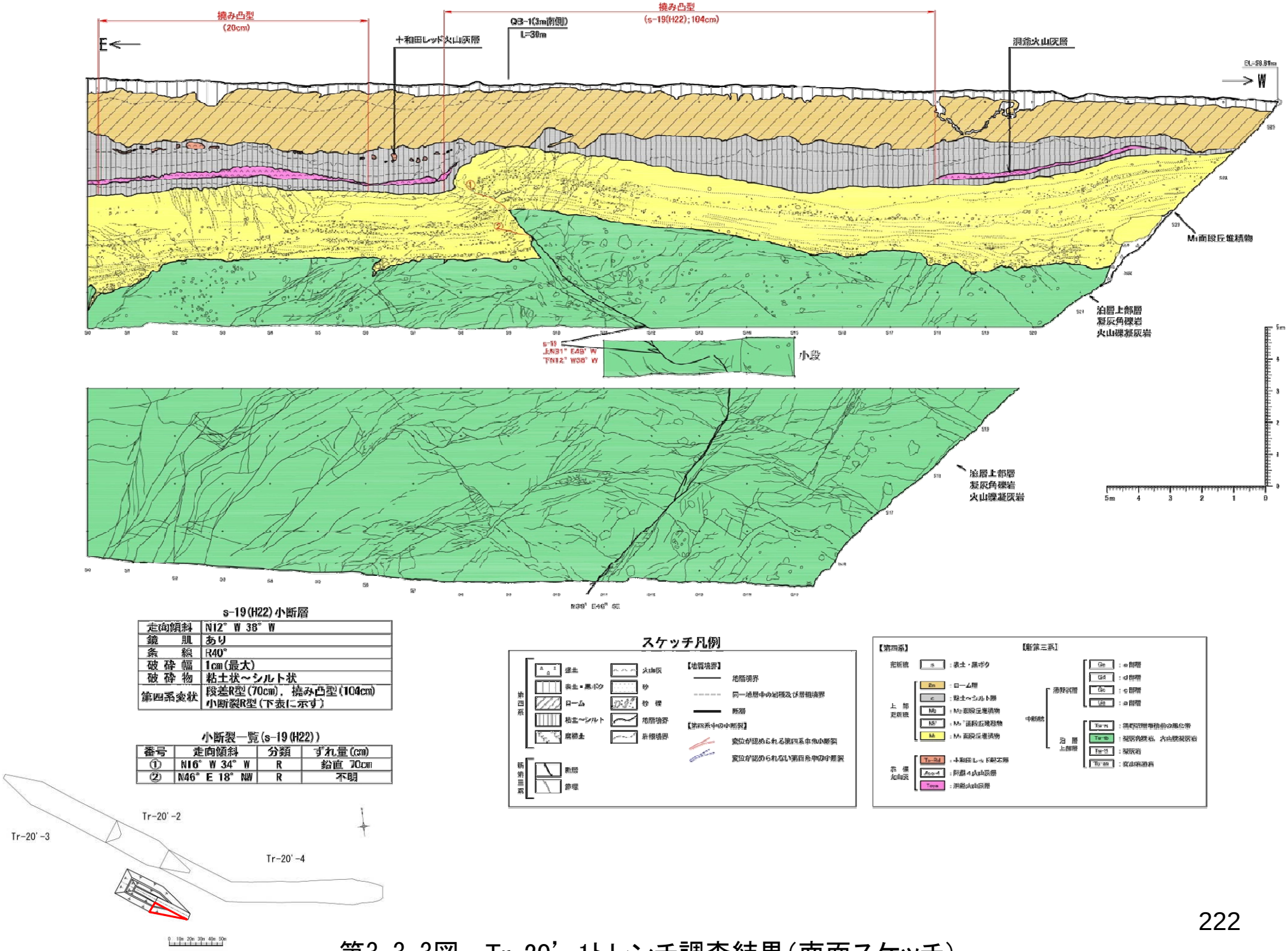
主要な断層は幅の広い破砕部よりなる劣化部を伴い，その他の断層，小断層では厚い風化部よりなる劣化部を伴っていることが多い。

第3.3-1図　岩盤劣化部の特徴

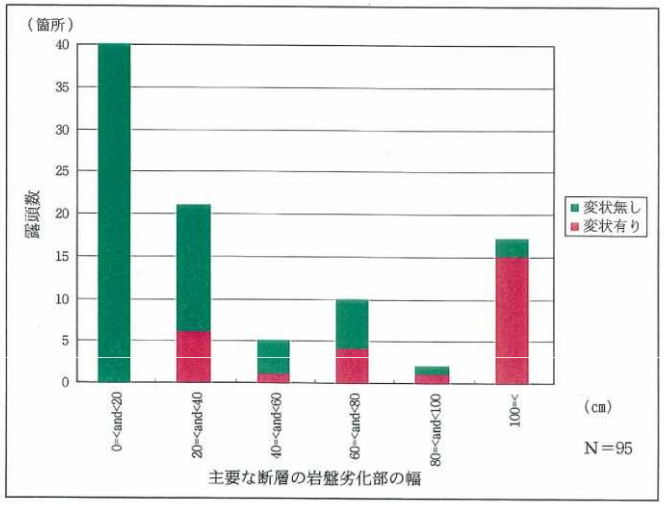




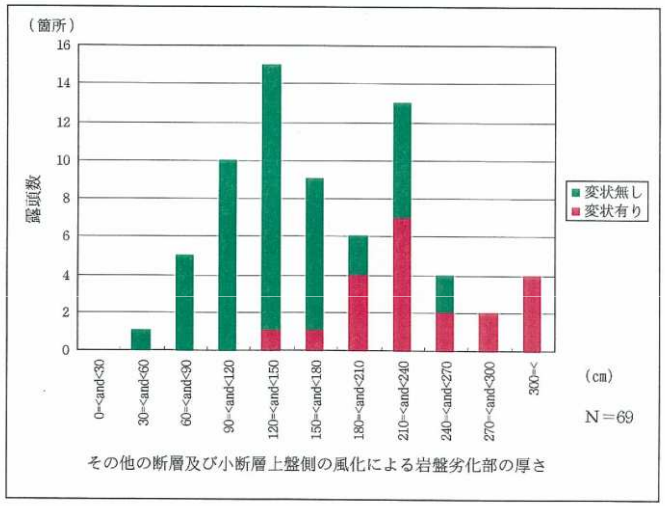
第3.3-2図　Tr-20'-2トレンチ調査結果(北面スケッチ)



第3.3-3図　Tr-20'-1トレンチ調査結果(南面スケッチ)

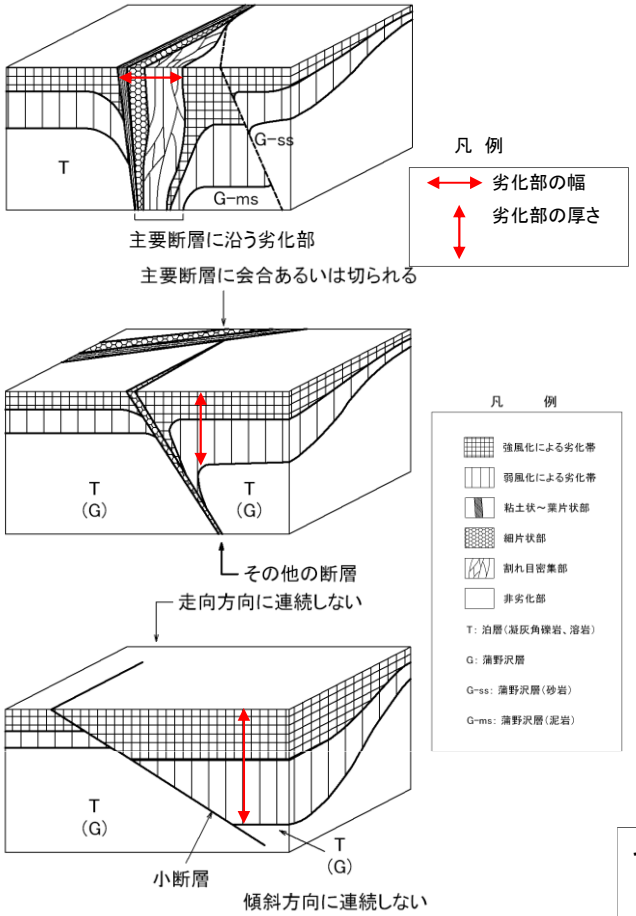


主要な断層の劣化部の幅と変状の有無

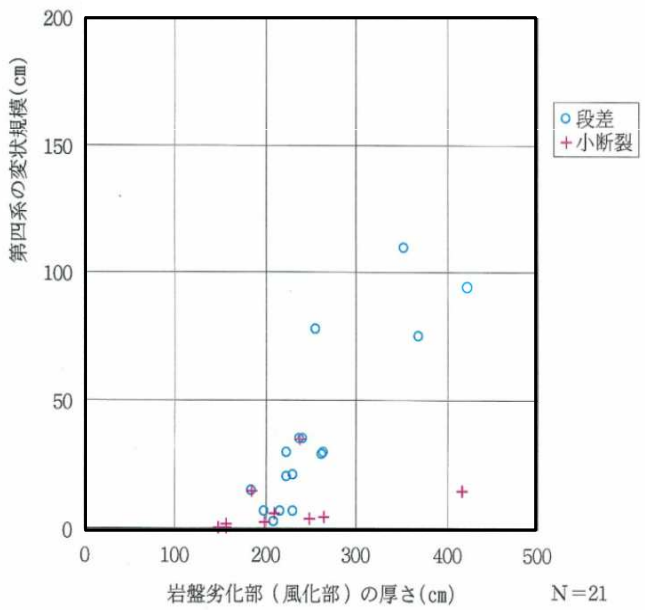


その他の断層及び小断層岩盤劣化部（風化部の厚さと変状の有無）

主要な断層は岩盤劣化部（断層破砕部の幅）が大きくなるに従い変状の出現率が高くなる傾向がある



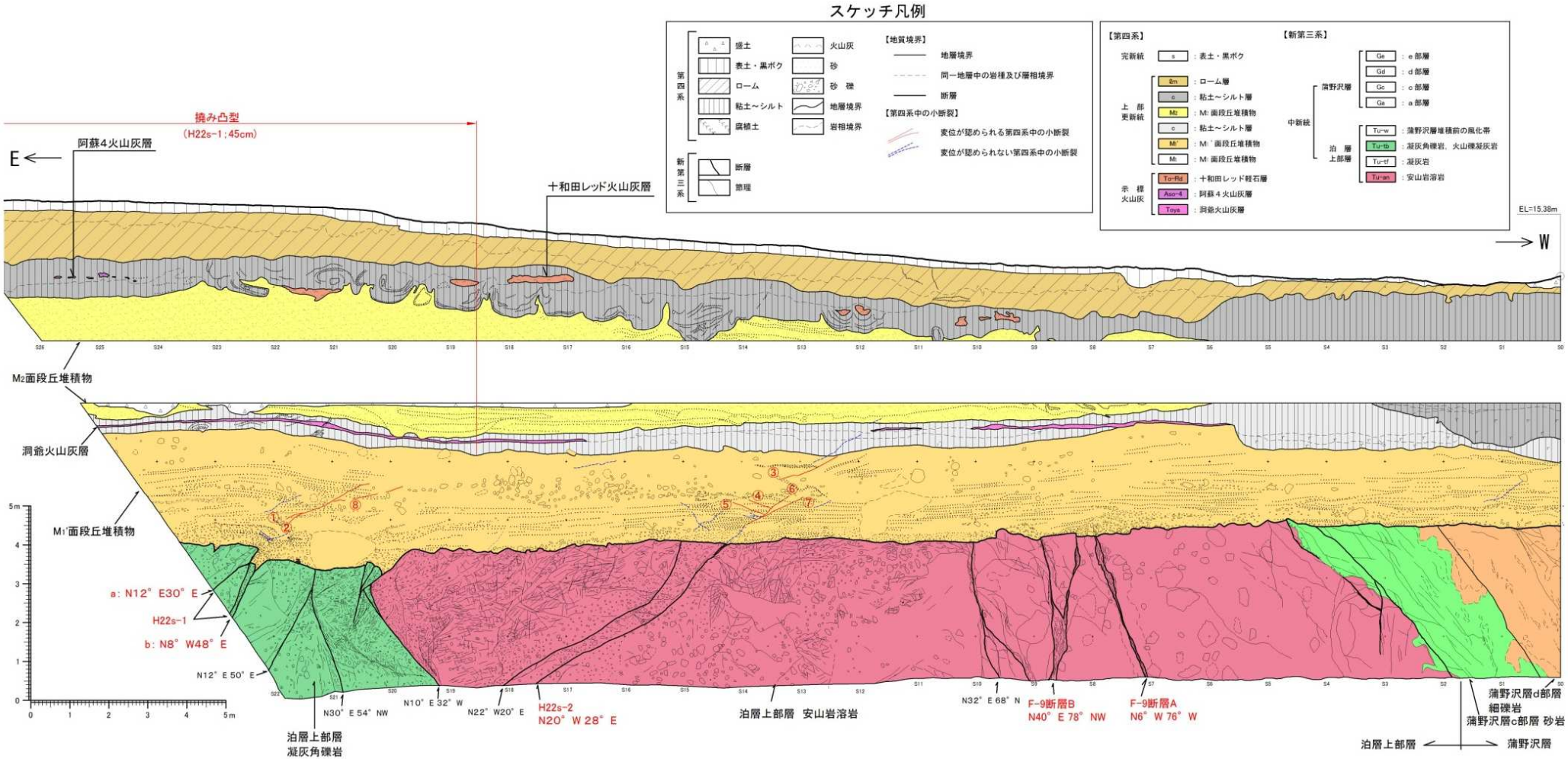
その他の断層及び小断層は岩盤劣化部（表層の風化部）の厚さが大きくなるに従い変状の出現率が高くなる傾向がある



変状規模と岩盤劣化部（風化部）の厚さの関係

その他の断層及び小断層は岩盤劣化部（表層の風化部）の厚さが大きくなるに従い変状の規模が大きくなる傾向がある

第3.3-4図　第四系の変状と岩盤劣化部の関係



H22s-1小断層

走向傾斜	a:N12° E30° E, b:N8° W48° E
鏡　肌	あり
条　線	不明瞭
破 砕 幅	a:0.5cm, b:1～2cm
破 砕 物	a:細片～岩片状, b:粘土～シルト状
第四系変状	段差R型(28cm), 撓み凸型(45cm) 小断裂R型(下表に示す)

H22s-2小断層

走向傾斜	N20° W28° E
鏡　肌	あり
条　線	R20° ～R65°
破 砕 幅	1～5cm
破 砕 物	葉片状(1cm), 細片～岩片状(4～5cm)
第四系変状	小断裂R型(下表に示す)

F-9断層B

走向傾斜	N40° E 78° NW
鏡　肌	あり
条　線	不明瞭
破 砕 幅	1～5cm
破 砕 物	葉片状, セピオライト
第四系変状	なし

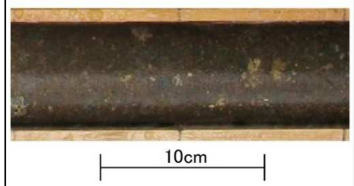
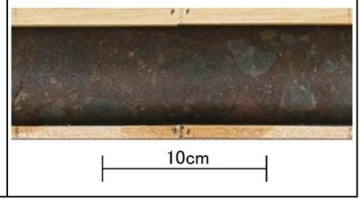
F-9断層A

走向傾斜	N6° W 76° W
鏡　肌	あり
条　線	不明瞭
破 砕 幅	5～10cm
破 砕 物	葉片状, セピオライト
第四系変状	なし

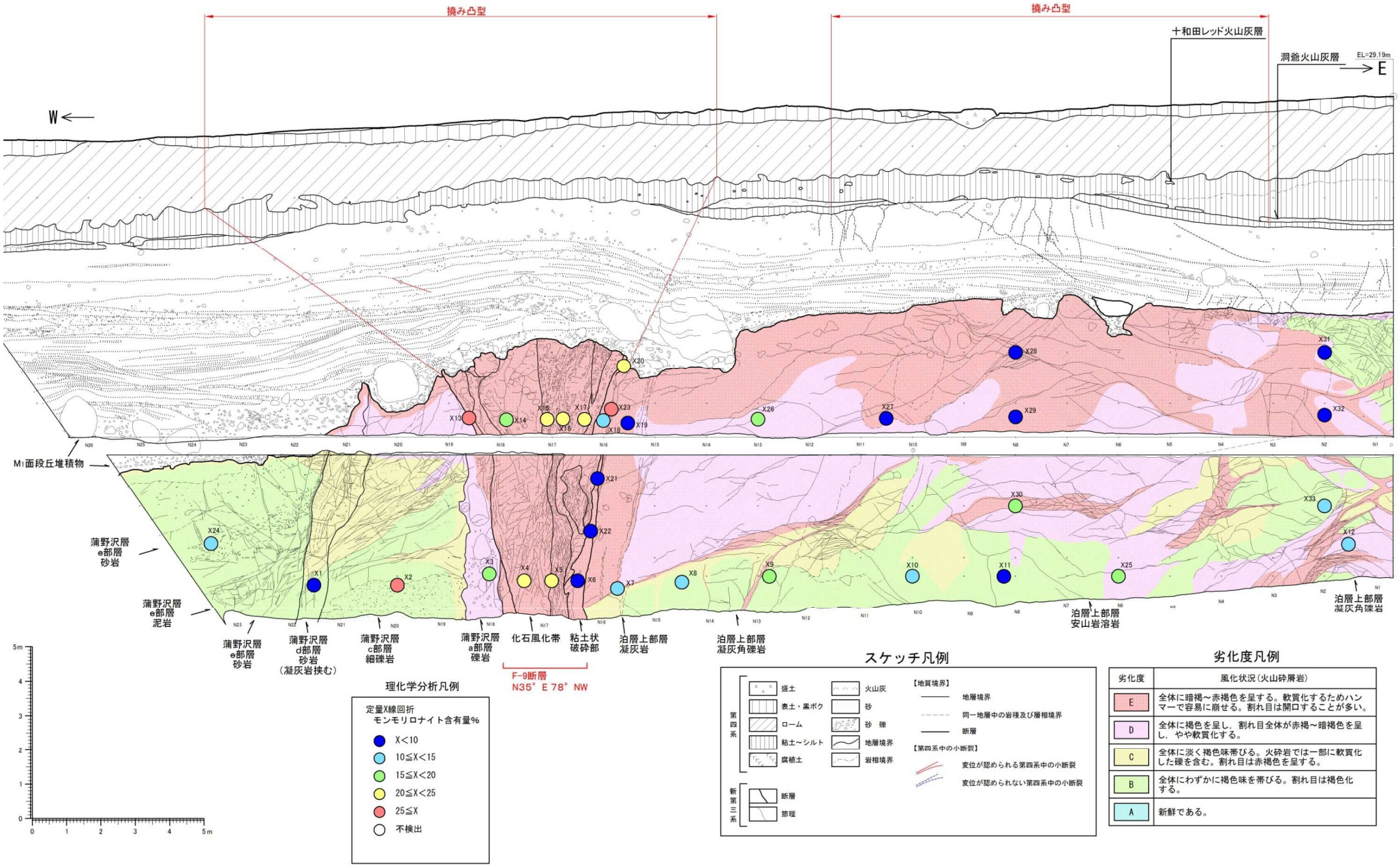
小断裂一覧(H22s-1,H22s-2)

番号	走向傾斜	分類	ずれ量(cm)
①	N20° E 24° E	R	鉛直 1.4cm
②	N19° E 35° E	R	鉛直 1.4cm
③	N29° E 21° E	R	鉛直 2.5cm
④	N36° W 24° W	R	鉛直 0.4cm
⑤	NS 21° W	R	鉛直 0.4cm
⑥	N20° W 25° E	R	鉛直 0.4cm
⑦	N30° W 25° E	R	鉛直 1.1cm
⑧	N75° E 22° S	R	鉛直 0.7cm

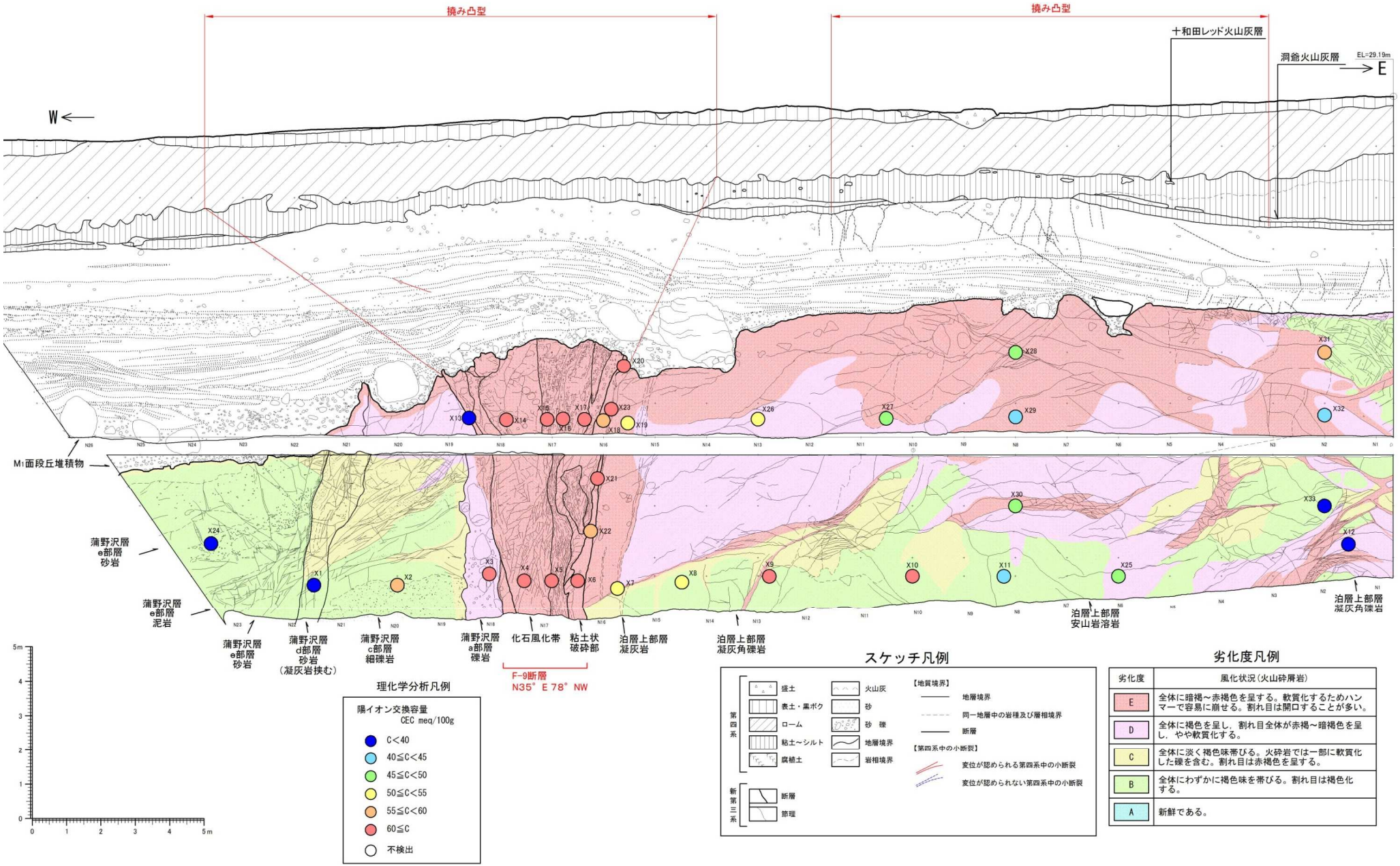
第3.3-5図　2k’トレンチ調査結果（スケッチ）

劣化度	風化状況 （火山砕屑岩）	露頭・コア状況 （火山砕屑岩）
E	全体に暗褐～赤褐色を呈する。軟質化するためハンマーで容易に崩せる。 割れ目は開口することが多い。	
D	全体に褐色を呈し，割れ目全体が赤褐～暗褐色を呈し，やや軟質化する。	
C	全体に淡く褐色味帯びる。 火砕岩では一部に軟質化した礫を含む。 割れ目は赤褐色を呈する。	
B	全体にわずかに褐色味を帯びる。 割れ目は褐色化する。	
A	新鮮である。	

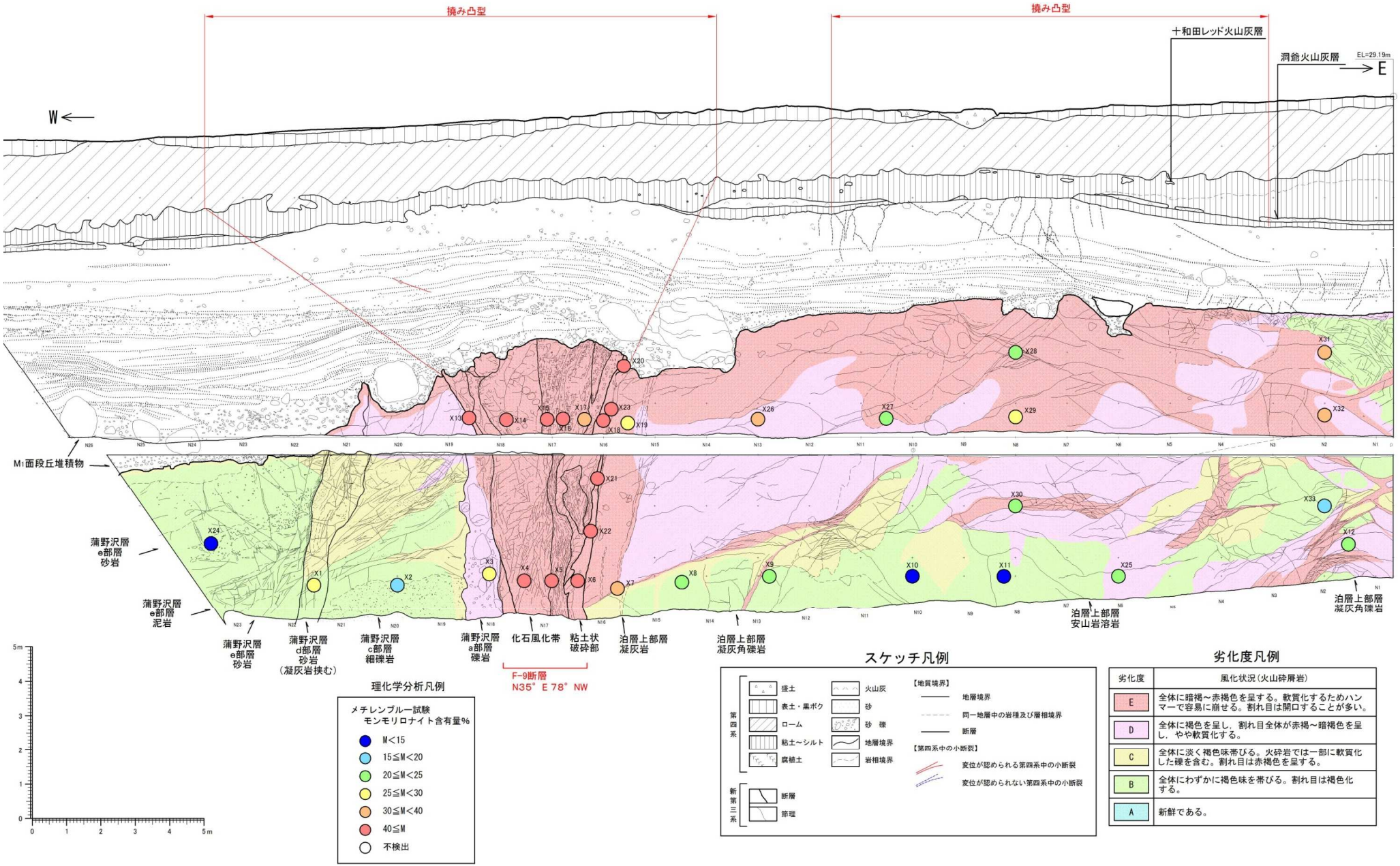
第3.3-6図　劣化度区分



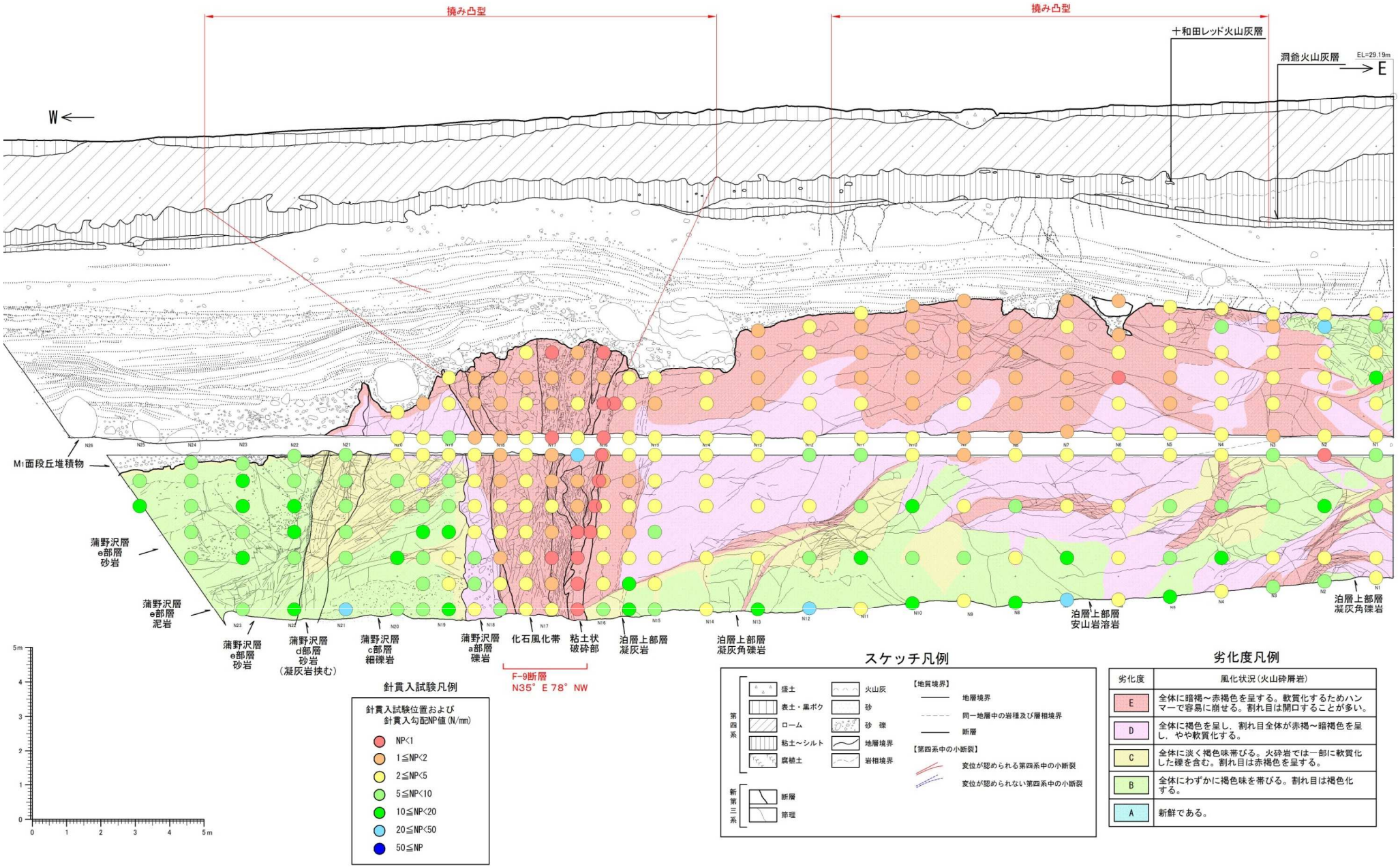
第3.3-7図(1)　理化学分析結果（Tr-20’-2トレンチ北面，定量Ｘ線回折分析）



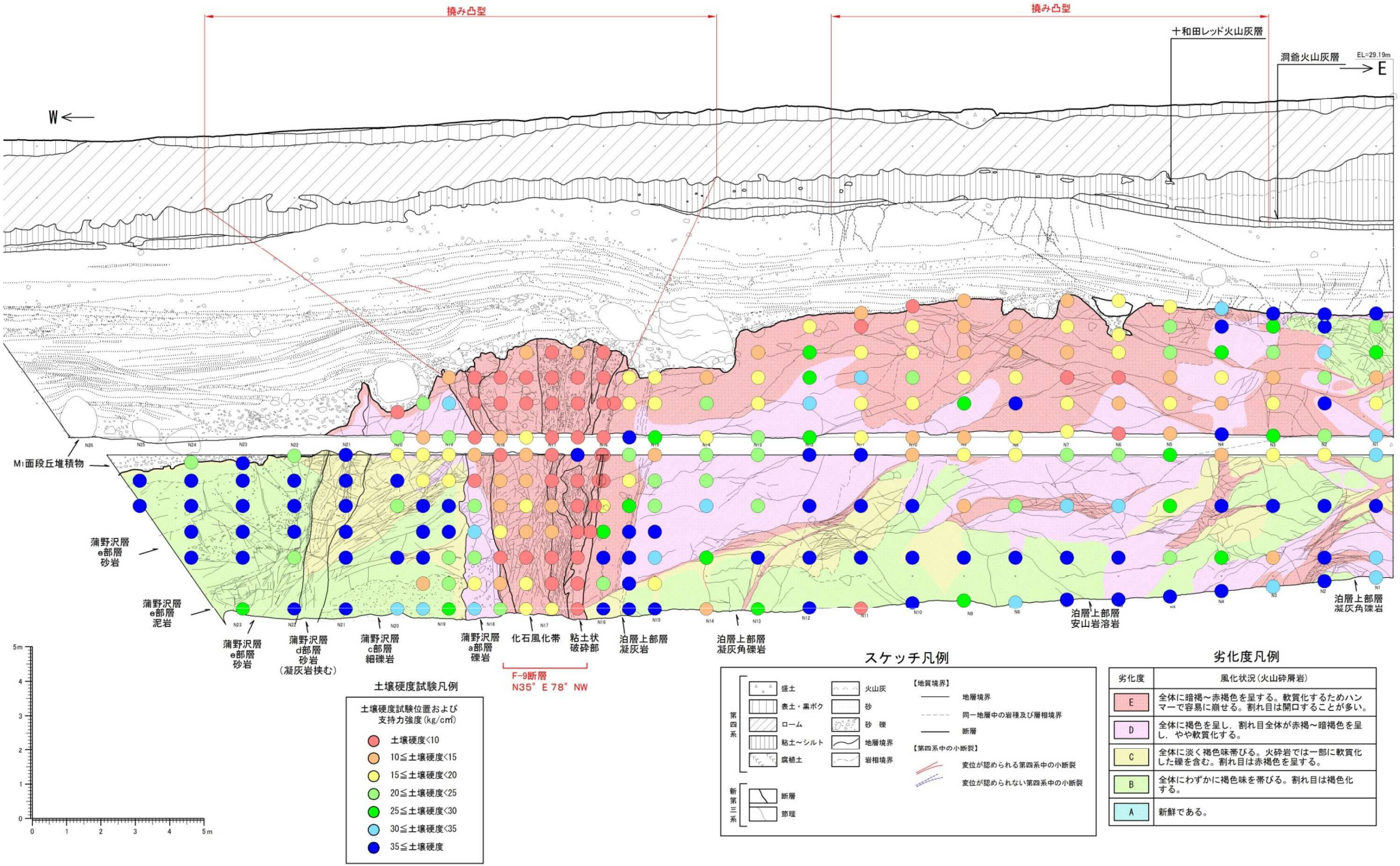
第3.3-7図(2)　理化学分析結果（Tr-20’-2トレンチ北面，ＣＥＣ試験）



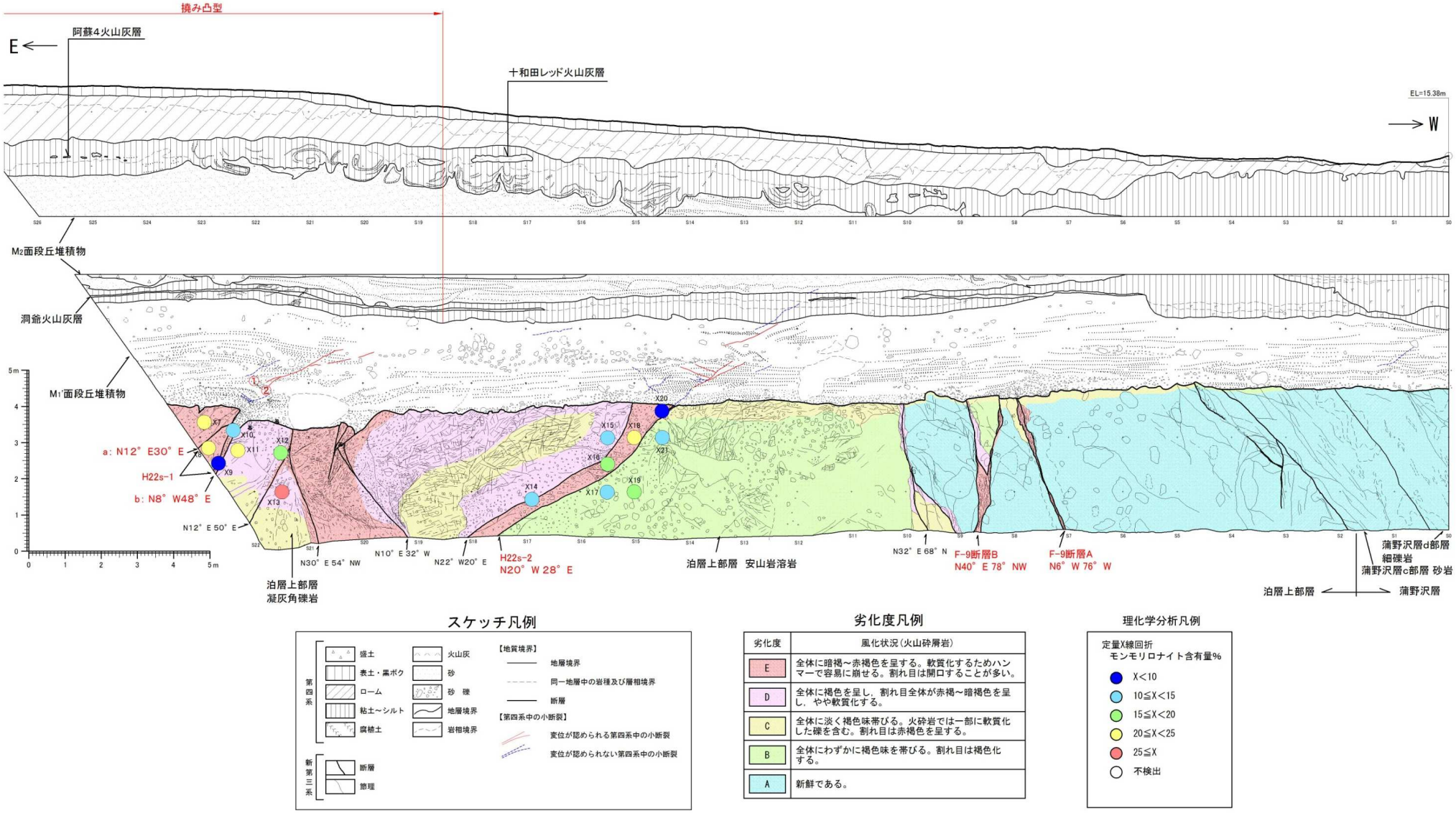
第3.3-7図(3)　理化学分析結果（Tr-20’-2トレンチ北面，メチレンブルー吸着量試験）



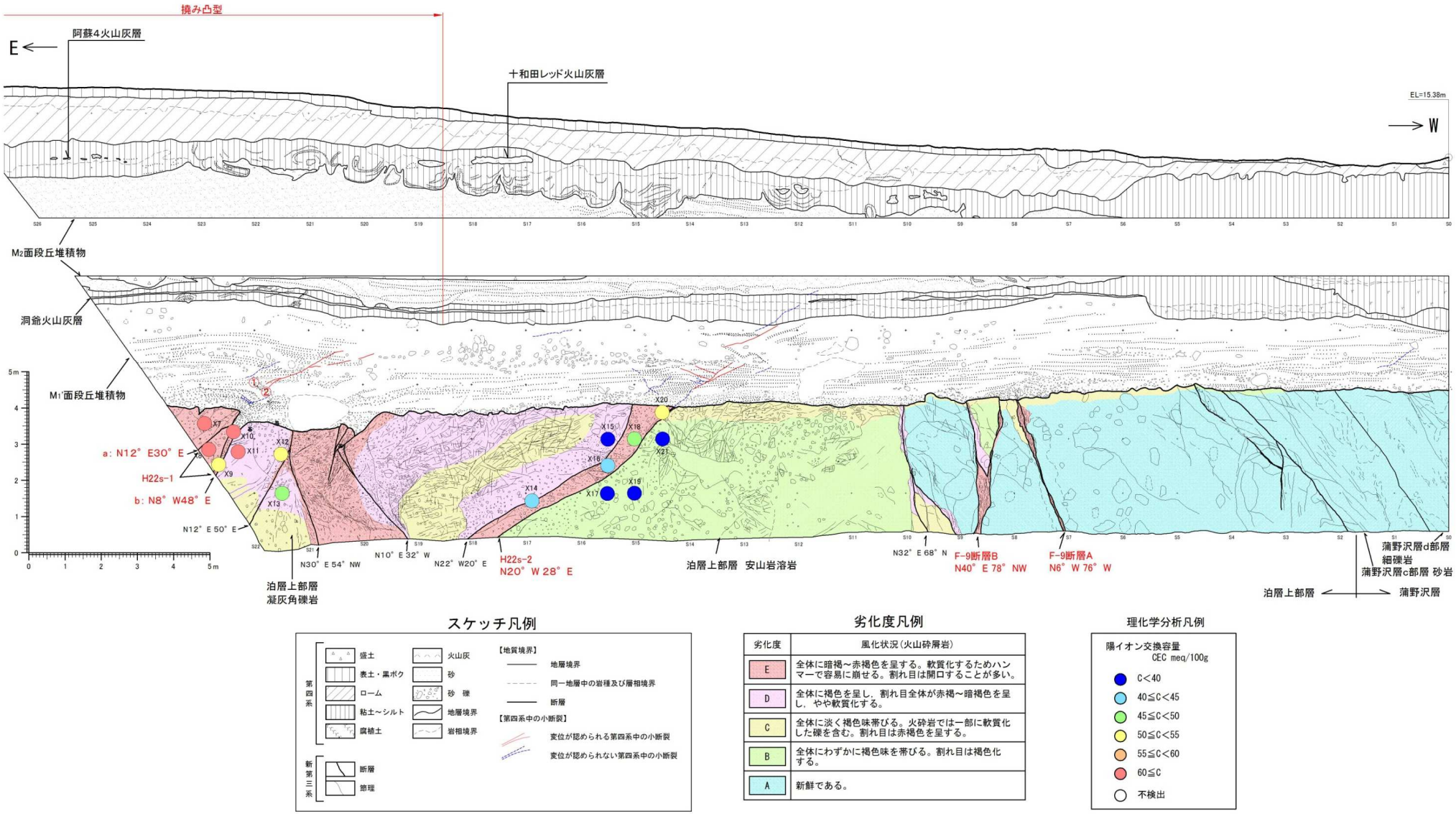
第3.3-8図(1)　物理試験結果（Tr-20’-2トレンチ北面,針貫入試験 ）



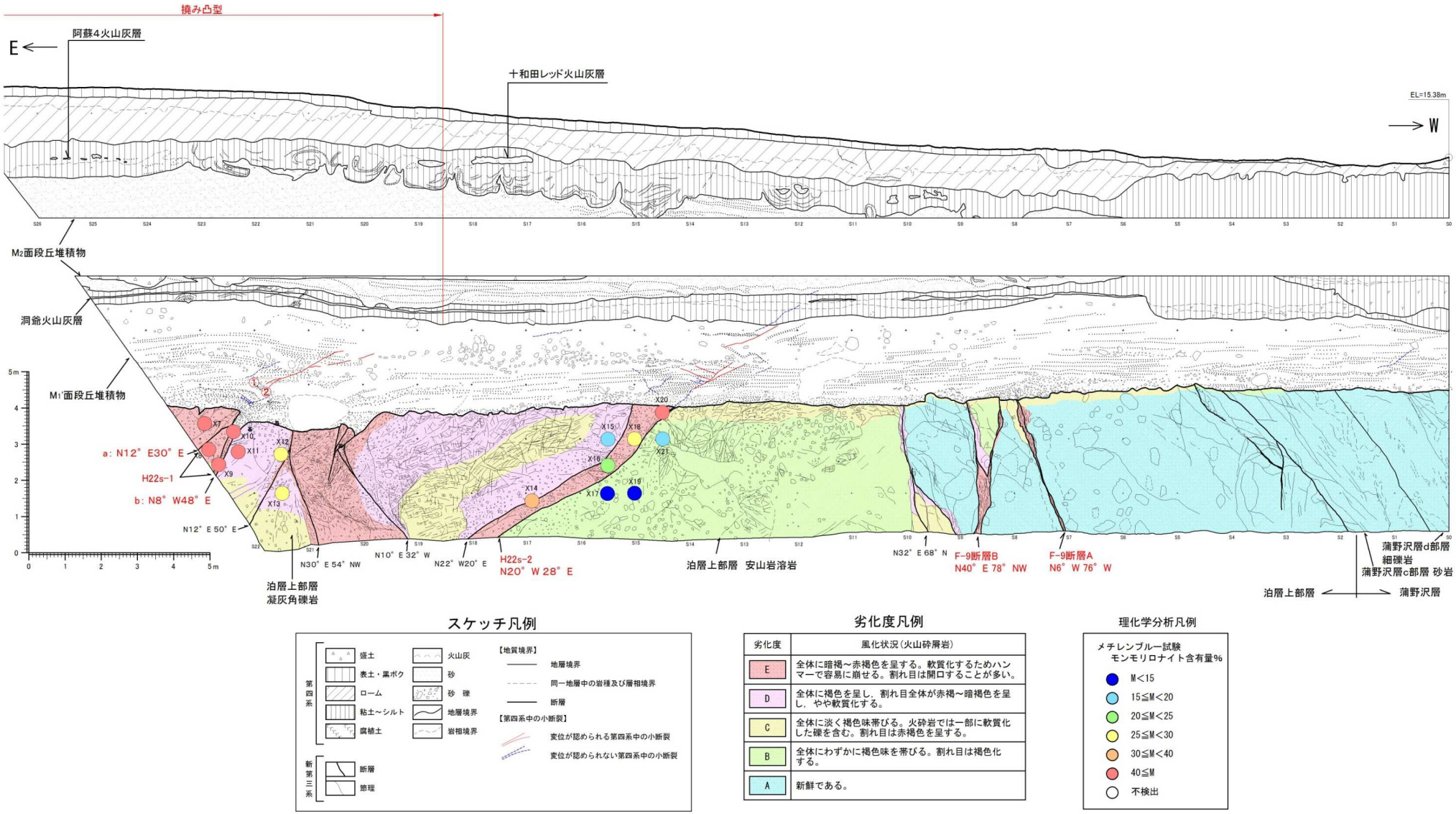
第3.3-8図(2)　物理試験結果（Tr-20’-2トレンチ北面,土壌硬度試験 ）



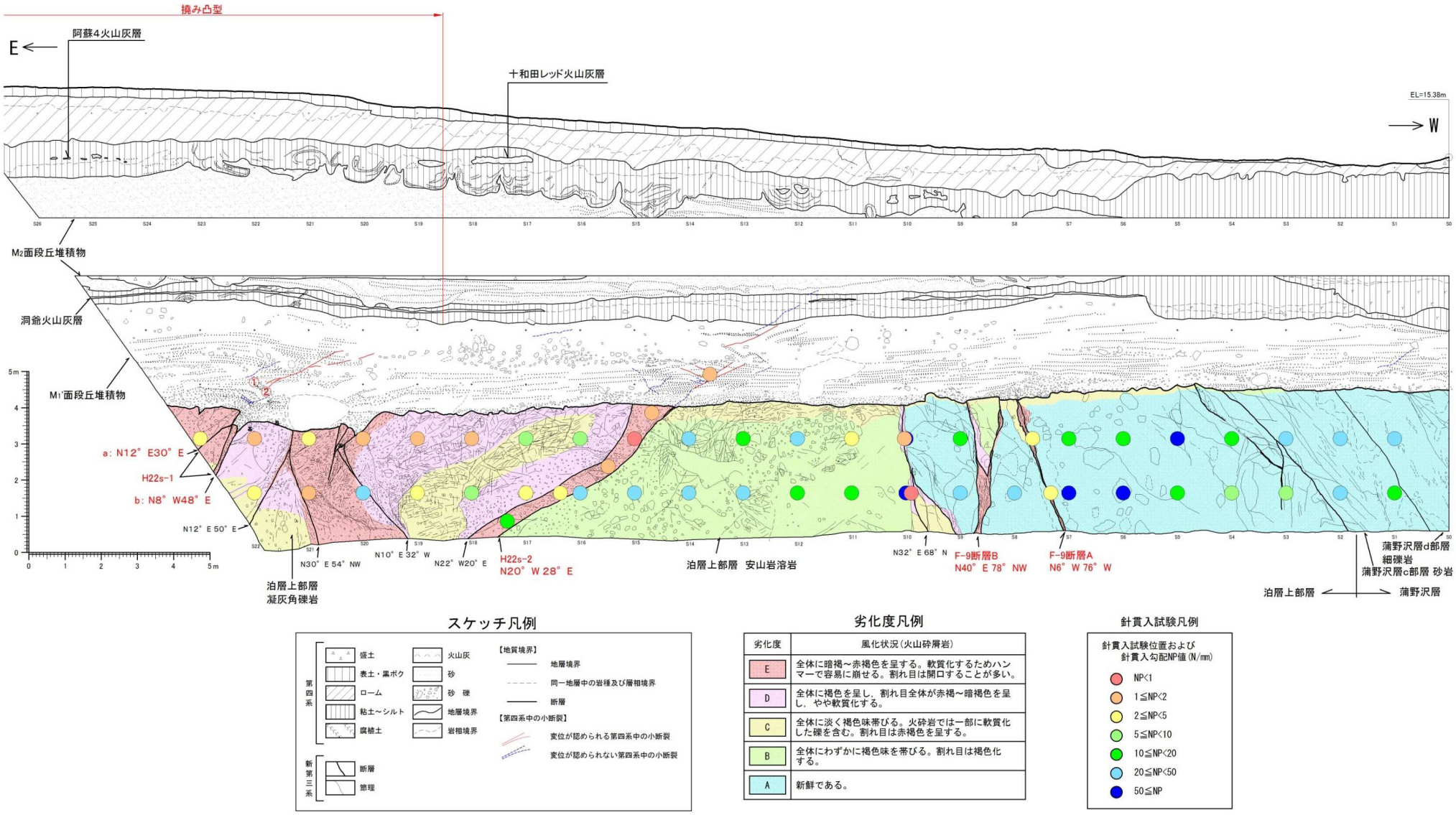
第3.3-9図(1)　理化学分析結果（2k'トレンチ南面，定量X線回折分析）



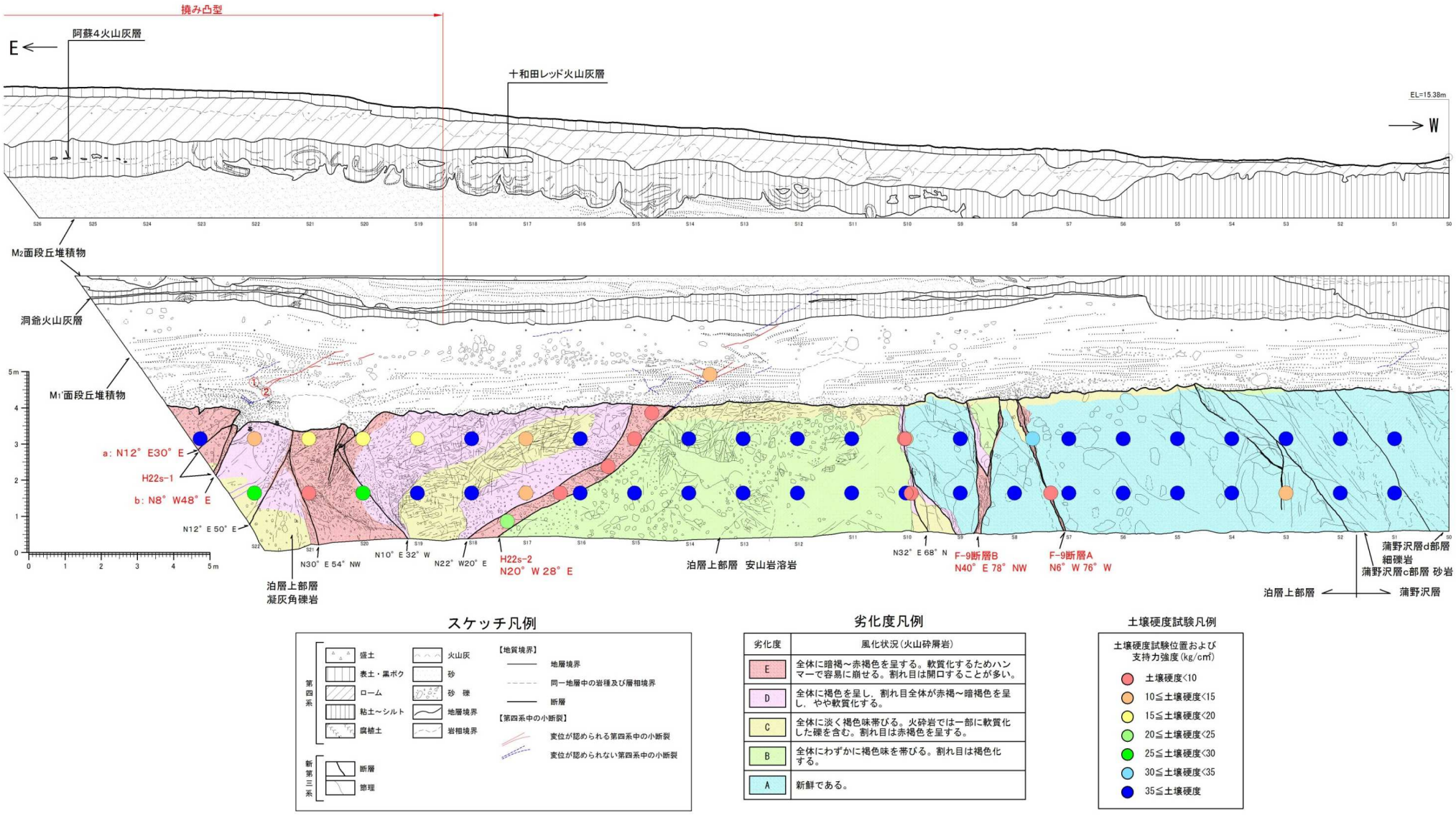
第3.3-9図(2)　理化学分析結果（2k'トレンチ南面，CEC試験）



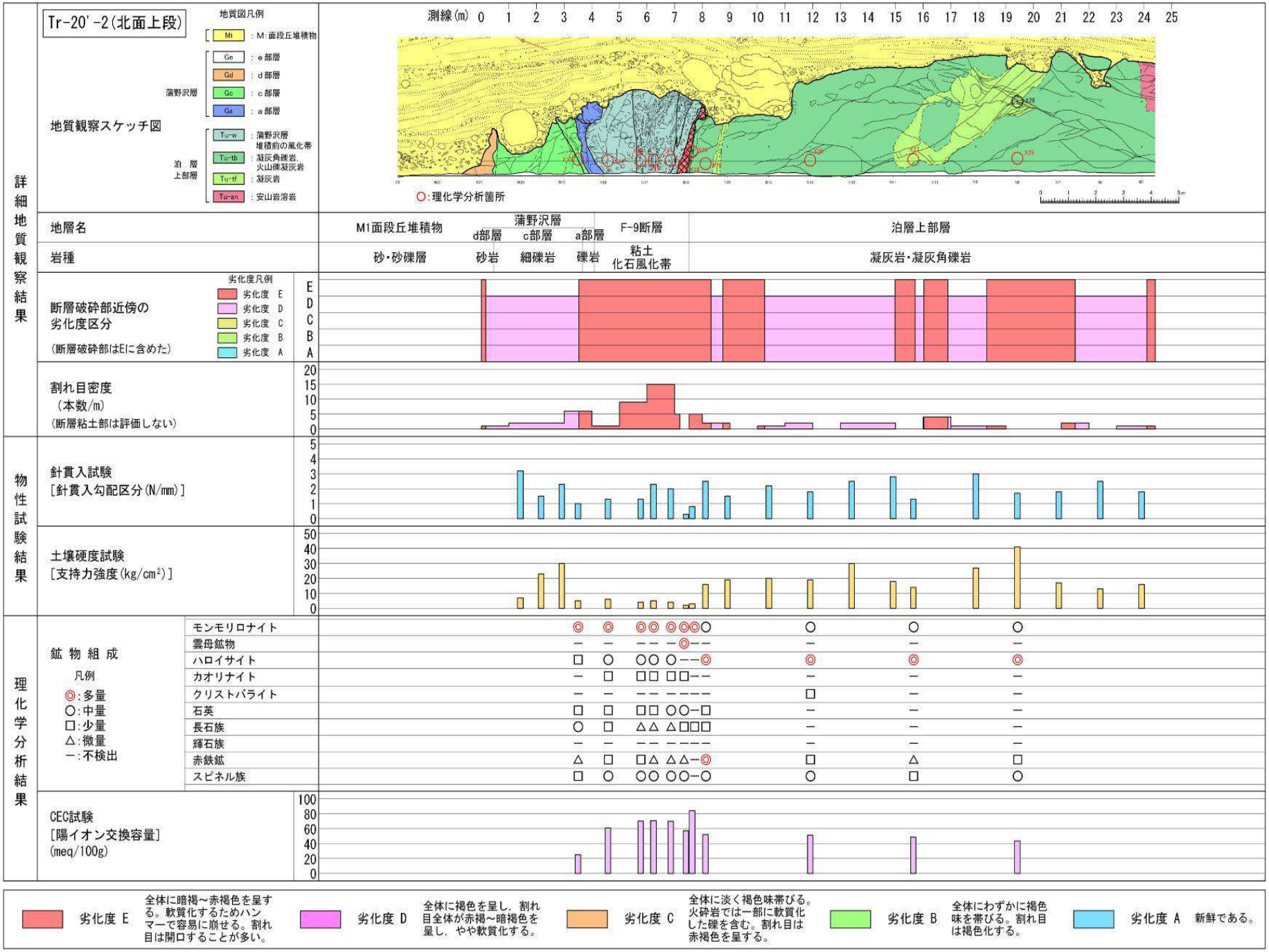
第3.3-9図(3)　理化学分析結果（2k'トレンチ南面，メチレンブルー吸着量試験）



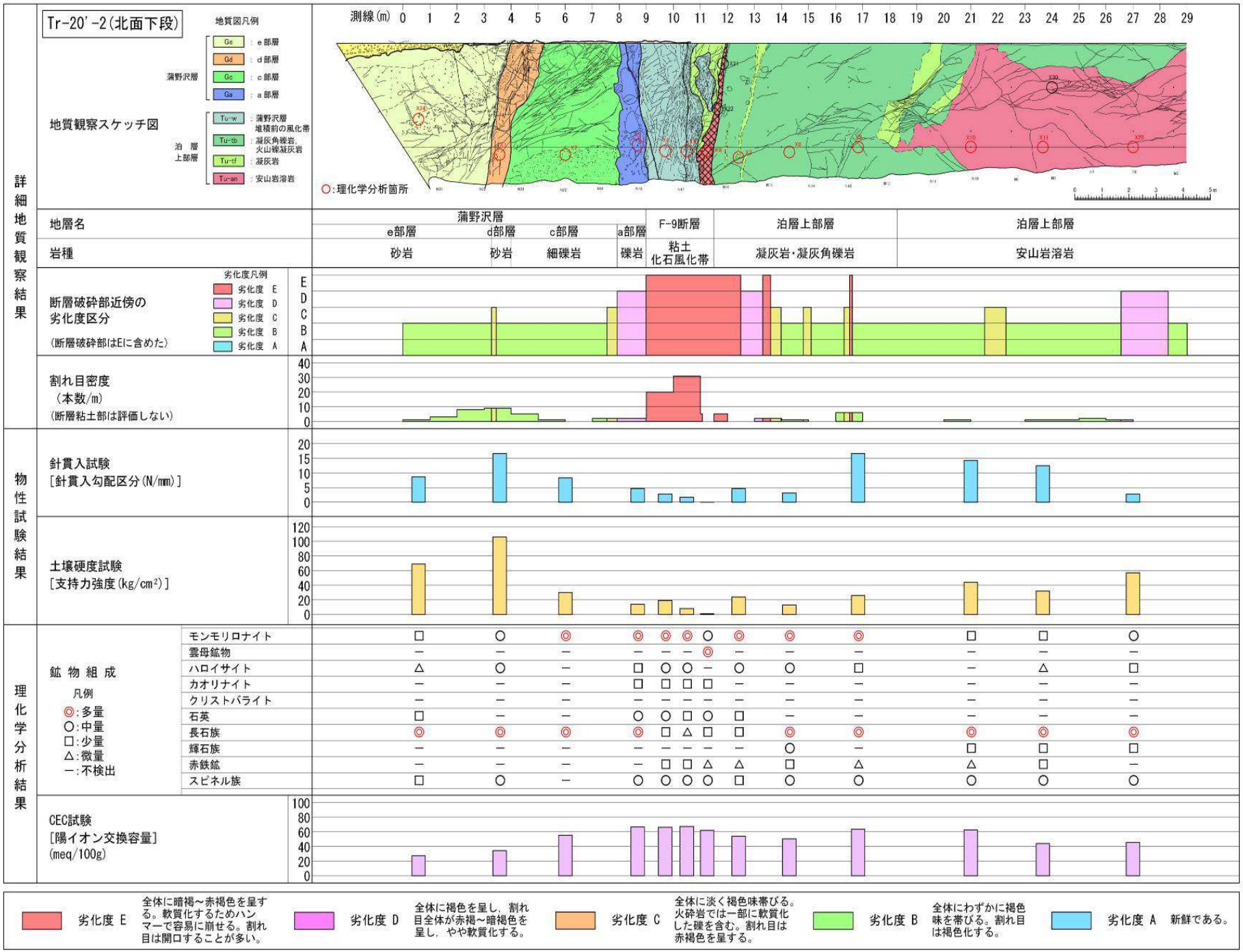
第3.3-10図(1)　物理試験結果（2k'トレンチ南面，針貫入試験）



第3.3-10図(2)　物理試験結果（2k'トレンチ南面，土壌硬度試験）



第3.3-11図(1)　岩盤劣化部の特徴（Ｆ－９断層，　Tr-20’-2トレンチ北面上段）



第3.3-11図(2)　岩盤劣化部の特徴（Ｆ－９断層，　Tr-20'-2トレンチ北面下段）

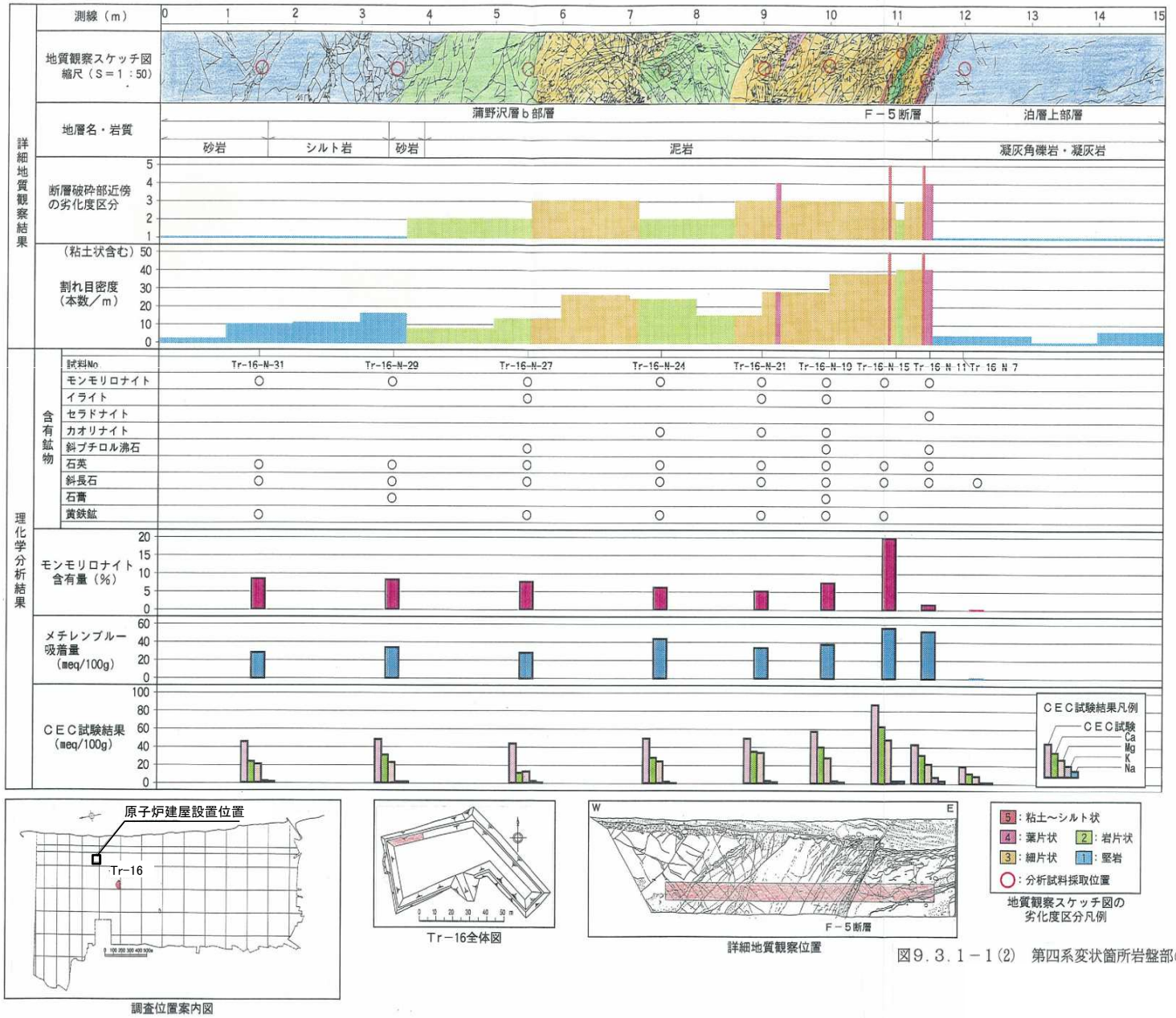
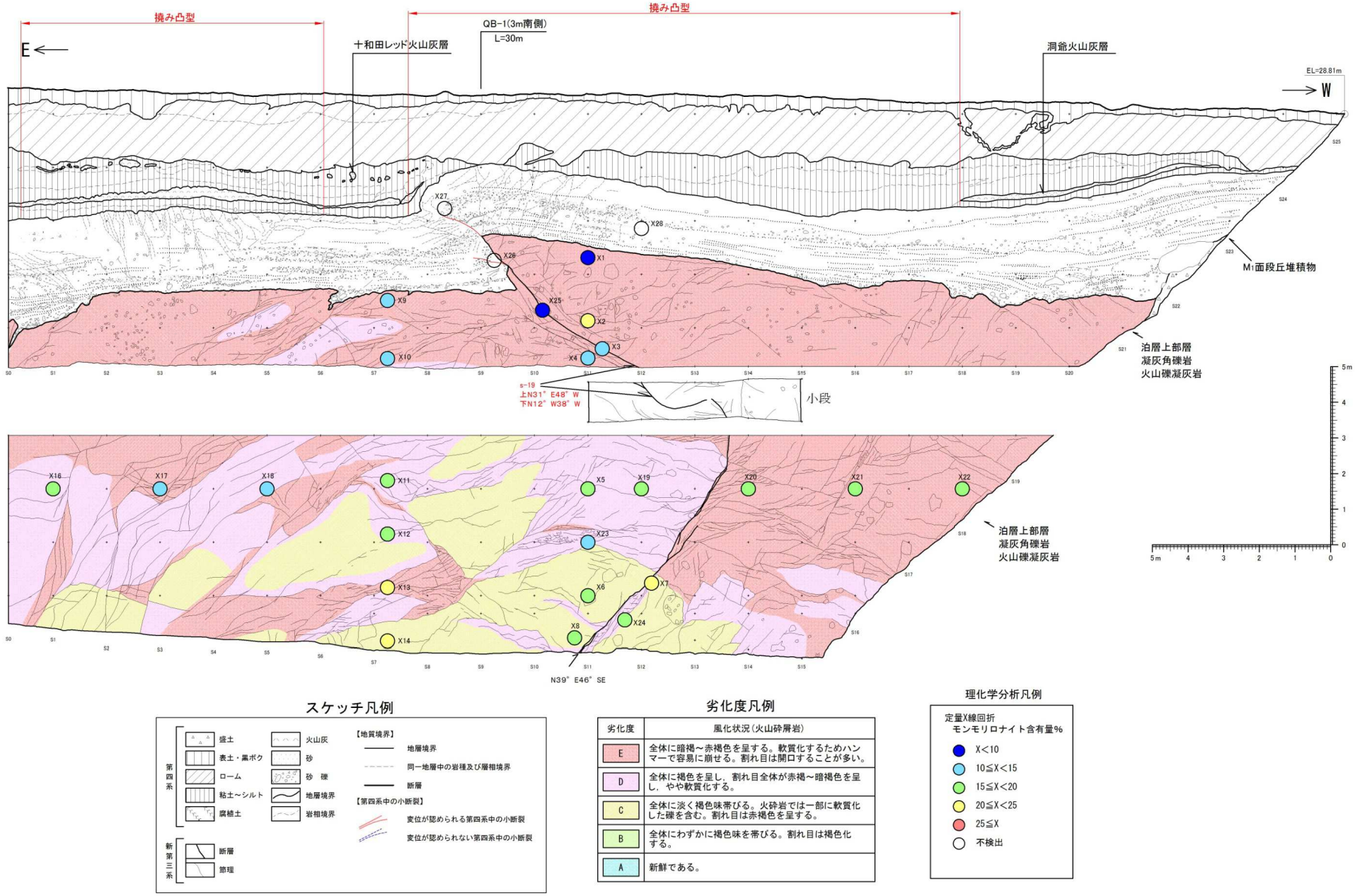


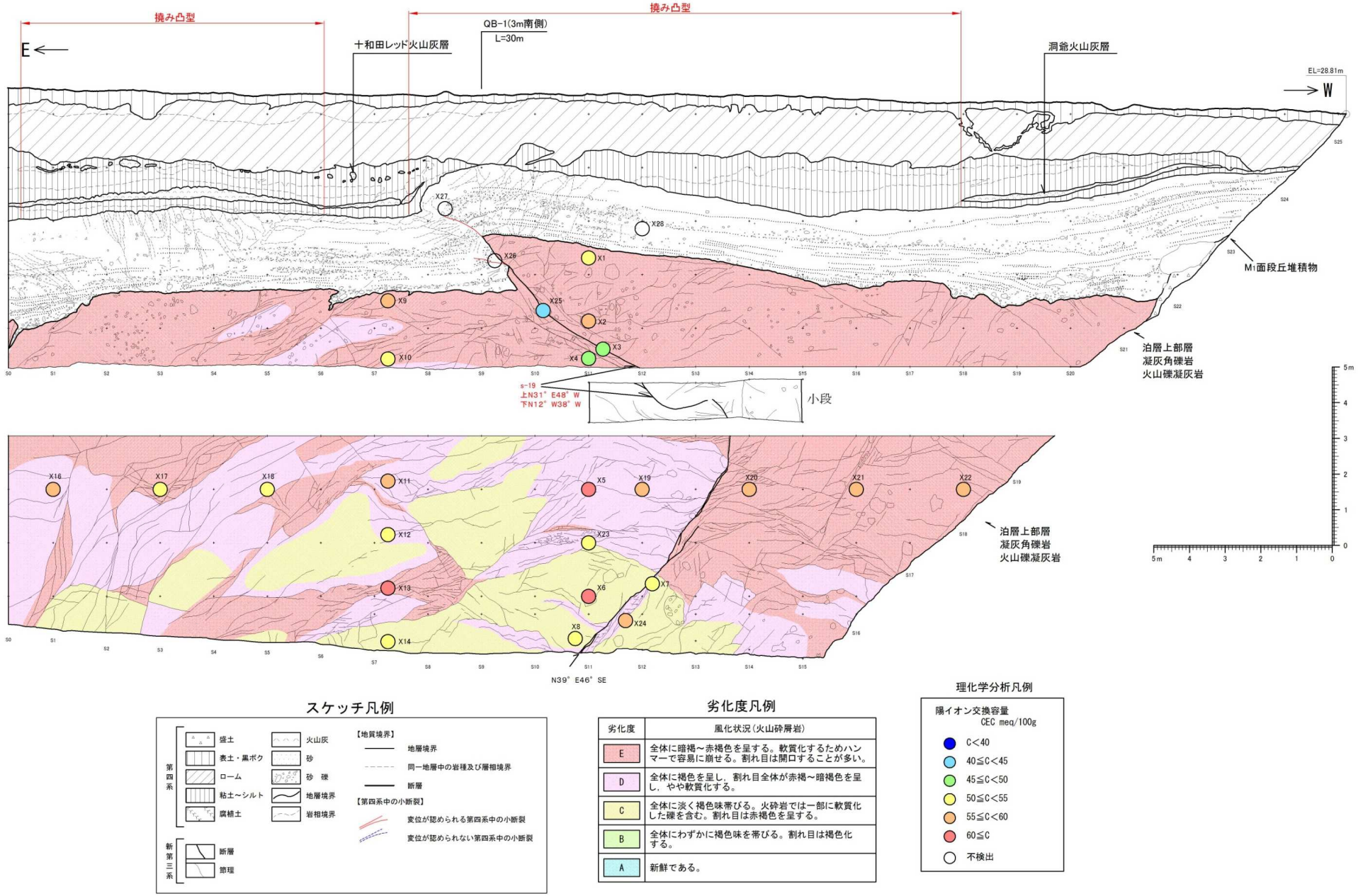
図9.3.1－1(2)　第四系変状箇所岩盤部の

第四系に変状の認められる主要な断層の岩盤劣化部（破砕部）の性状観察及び理化学分析を実施した結果，
岩盤劣化部は割れ目密度が大きく，風化が進行しており，モンモリロナイトを多く含む傾向があることが確認された。

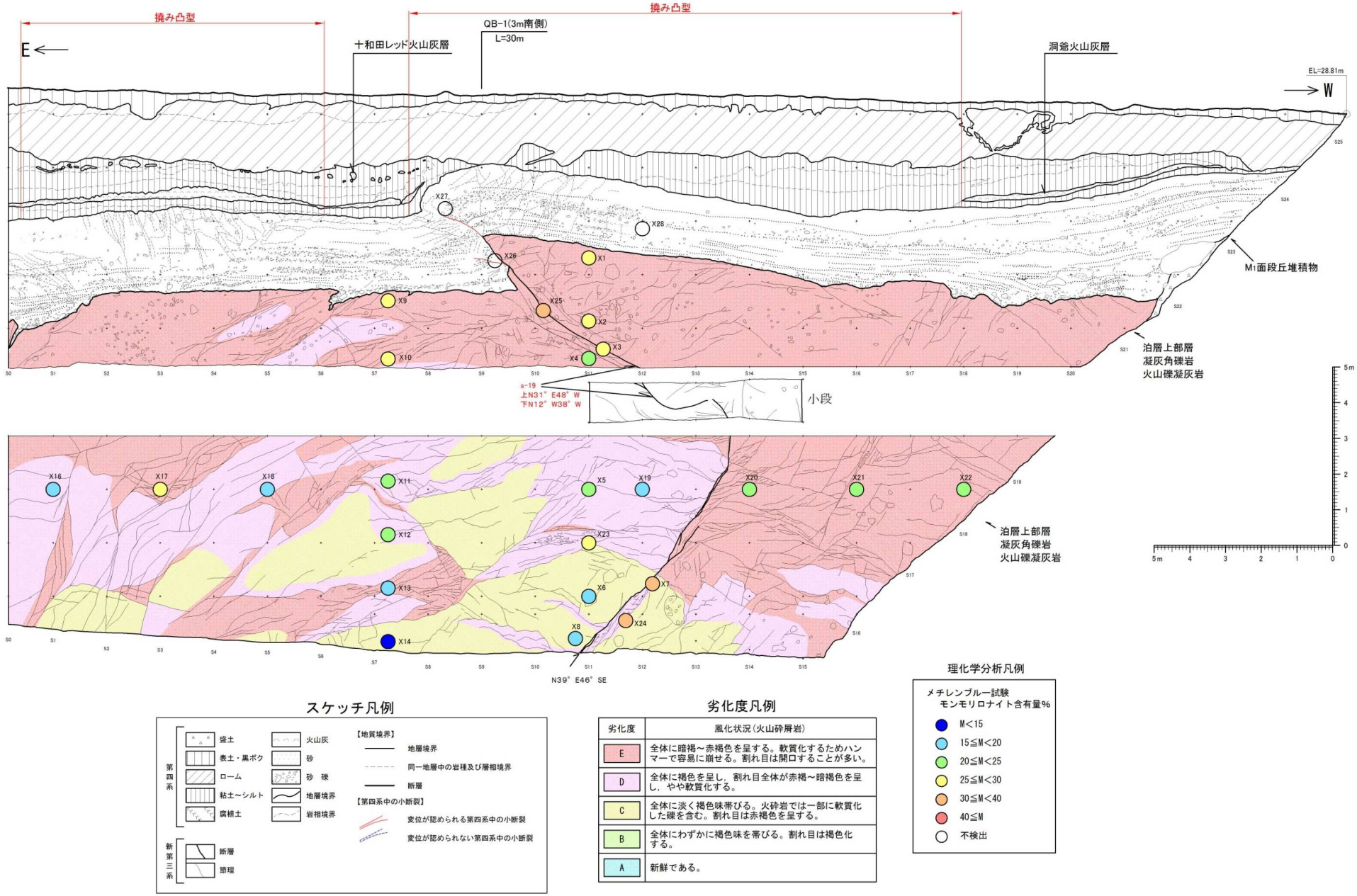
第3.3-12図　岩盤劣化部の特徴（Ｆ－５断層，Tr-16トレンチ北面）



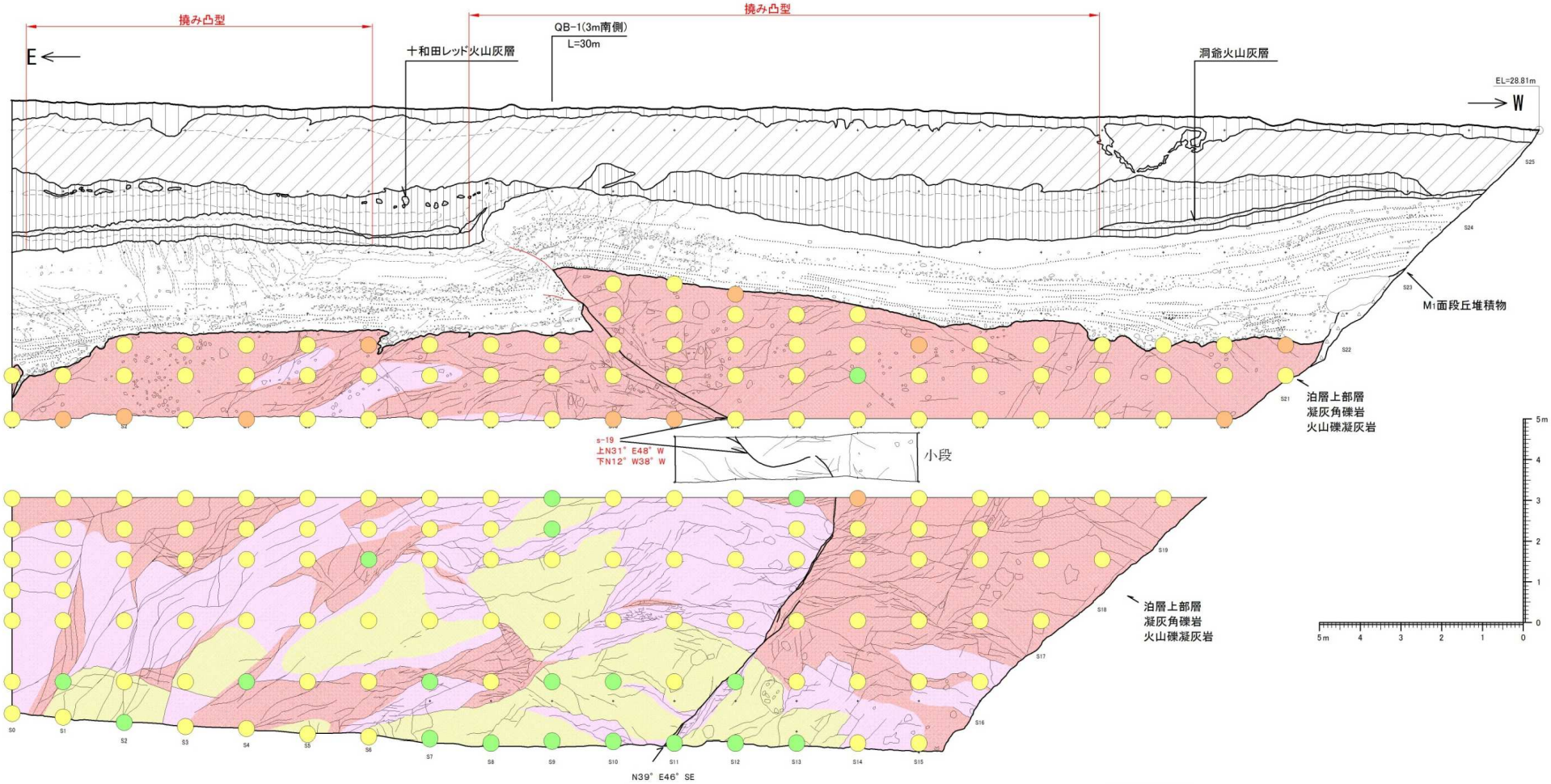
第3.3-13図(1)　理化学分析結果（Tr-20'-1トレンチ南面，定量X線回折分析）



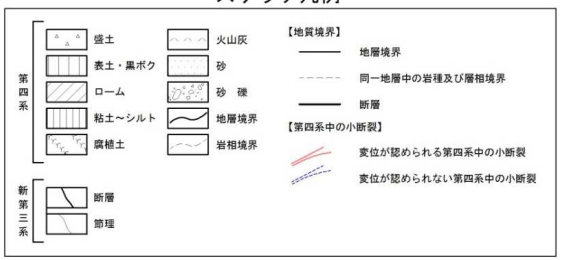
第3.3-13図(2)　理化学分析結果（Tr-20'-1トレンチ南面，CEC試験）



第3.3-13図(3)　理化学分析結果（Tr-20’-1トレンチ南面，メチレンブルー吸着量試験）



スケッチ凡例

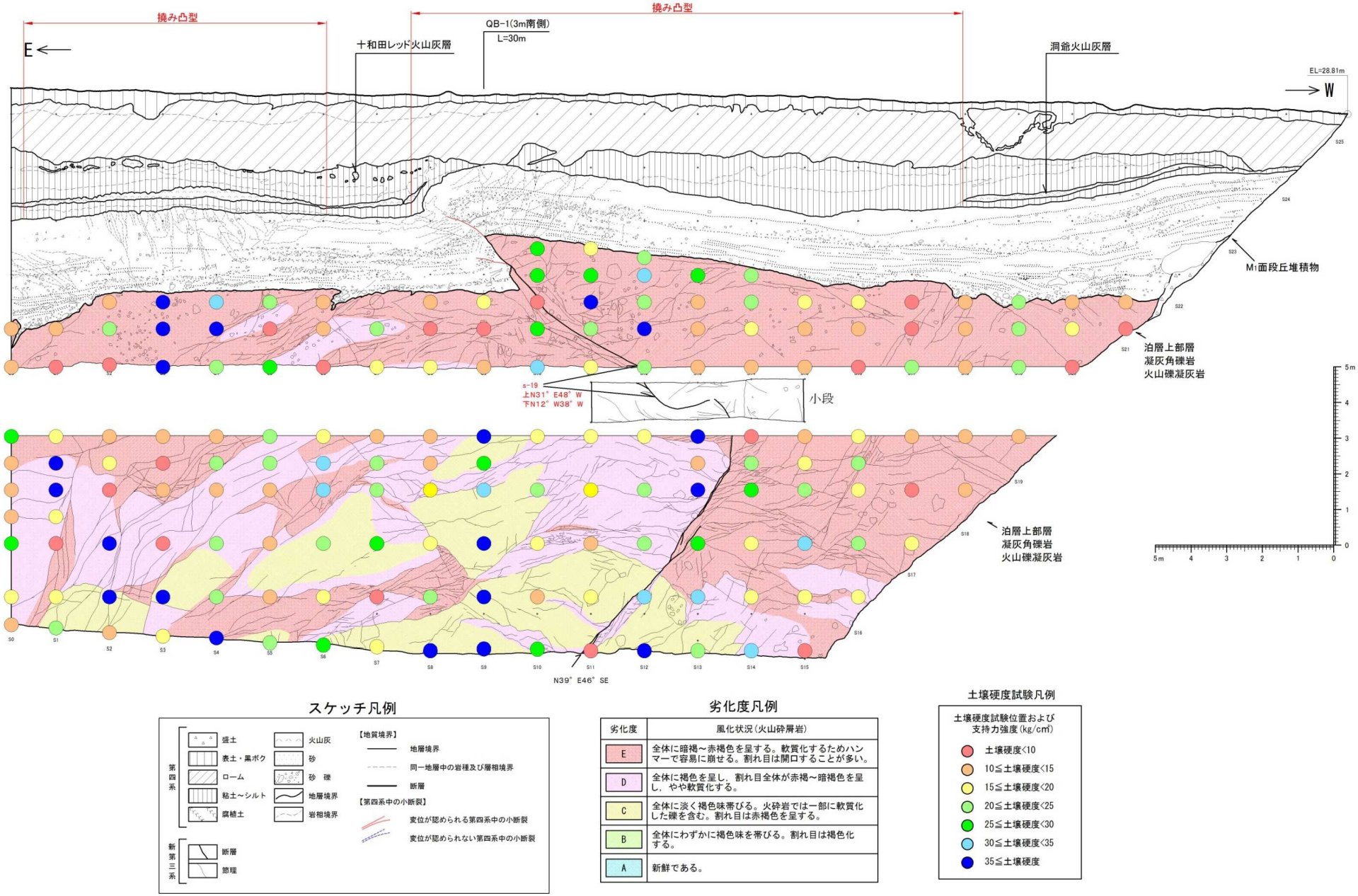


劣化度凡例

劣化度	風化状況(火山砕屑岩)
E	全体に暗褐～赤褐色を呈する。軟質化するためハンマーで容易に崩せる。割れ目は開口することが多い。
D	全体に褐色を呈し，割れ目全体が赤褐～暗褐色を呈し，やや軟質化する。
C	全体に淡く褐色味帯びる。火砕岩では一部に軟質化した礫を含む。割れ目は赤褐色を呈する。
B	全体にわずかに褐色味を帯びる。割れ目は褐色化する。
A	新鮮である。

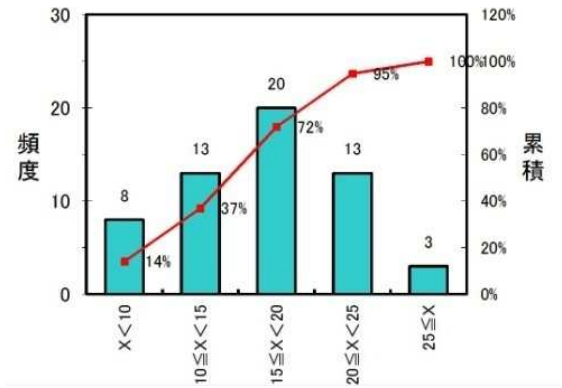
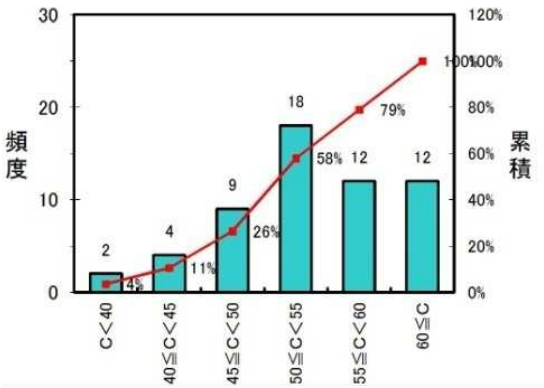
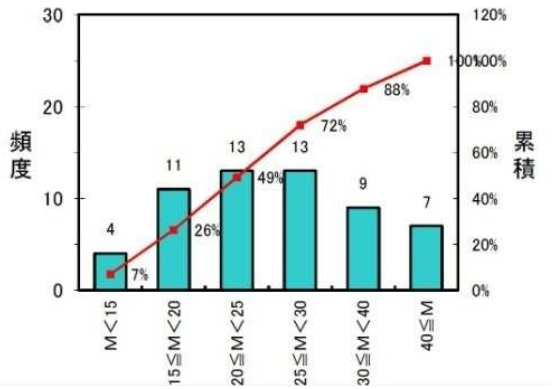
針貫入試験凡例

第3.3-14図(1)　物理試験結果（Tr-20'-1トレンチ南面，針貫入試験）



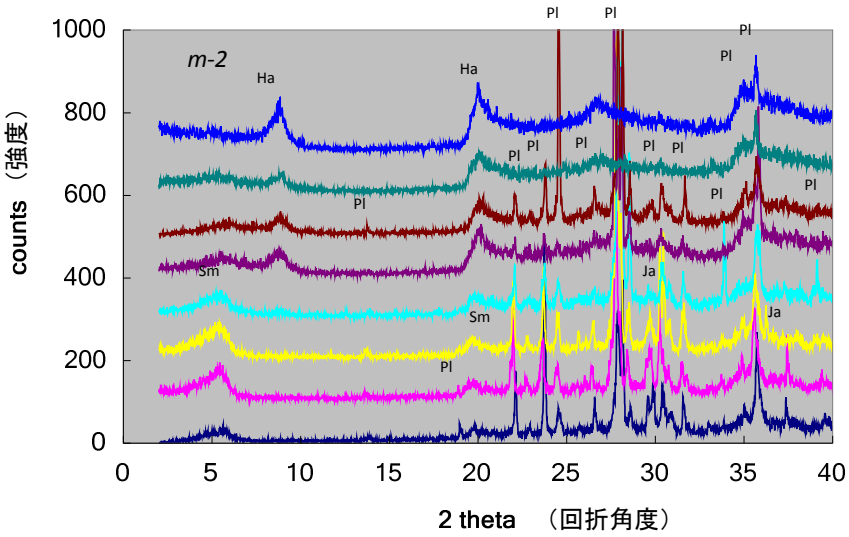
第3.3-14図(2)　物理試験結果（Tr-20'-1トレンチ南面，土壌硬度試験）

泊層上部層（凝灰角礫岩，F-9断層破砕部を除く）の理化学分析結果

定量X線回折分析 ［スメクタイト含有量（%）］	CEC試験 ［陽イオン交換容量（meq/100）g］	メチレンブルー吸着量試験 ［モンモリロナイト含有量］
		
モンモリロナイト回折線のうち，回折線の強度が最も大きく，かつ特徴的な回折線である（001）面の回折線の積分強度を測定し，岩石中に含まれる膨潤性粘土鉱物（モンモリロナイト）の定量を行う	イオン交換現象を利用して，モンモリロナイト等の膨潤性粘土鉱物，結晶度の低い沸石等の含有量を半定量的に把握する	試料中に含まれる膨張性粘土鉱物のメチレンブルー吸着量を測定し，モンモリロナイトの含有量の概略把握を行う

第3.3-15図　泊層上部層の凝灰角礫岩の理化学分析結果

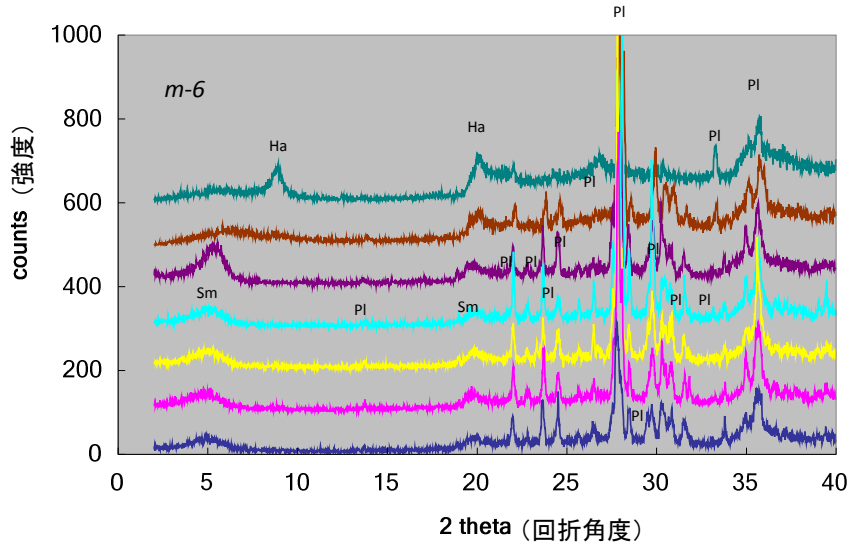
H25B-m2孔（着岩; 5.10m ）　Tr-20'-4（湿潤試料）



劣化度	深度（m）
E	5.2
E	7.9
C	9.05
D	11.27
B	12.4
B	16.3
A	17.37
A	52.2

- 泊層上部層表層11m付近までが著しく，厚く風化し，ハロイサイトが生成している。
- ハロイサイトは深部に向かって減少する傾向が認められる。
- 劣化度Eでは斜長石（Ca長石）がほとんど認められない。
- モンモリロナイトは8m以深から認められる
- 劣化度CからB（深度12m付近）でハロイサイトからモンモリロナイトへ移り変わる。

H25B-m6孔（着岩; 5.10m ）　Tr-20'-4（湿潤試料）



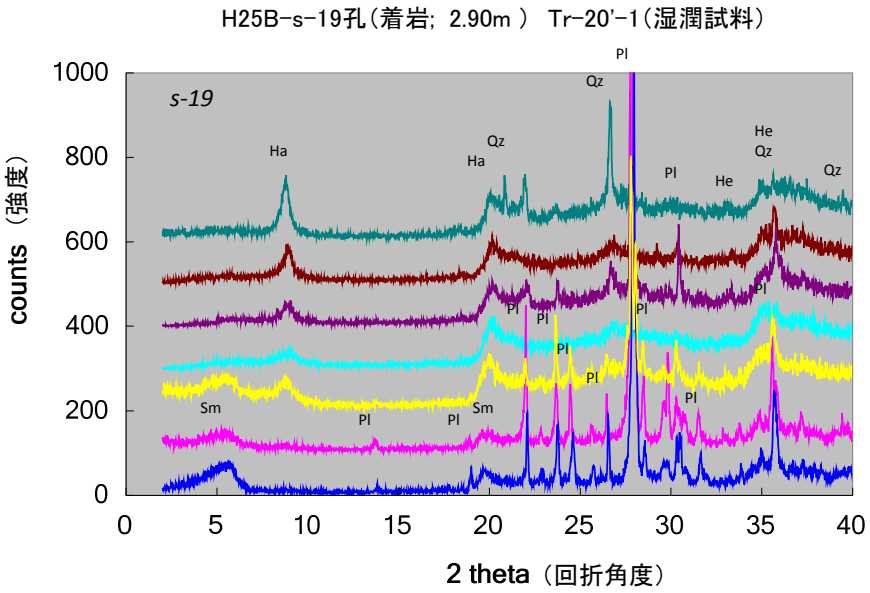
劣化度	深度（m）
E	5.17
E	5.48
B	6.00
B	6.65
A	8.6
A	11.15
A	22.61

- 泊層上部層の極表層のみが著しく風化し，ハロイサイトが生成している。
- 同様に極表層では斜長石が消失している。
- 深度6mから深部へモンモリロナイトが分布する。

- 浅所の著しく風化した箇所にハロイサイトが生成している。
- Ca斜長石，モンモリロナイトが消失し，ハロイサイトが晶出する。
- ハロイサイト化が厚い箇所で変状が顕著に認められる。

XRD PW3050/60 (philips;現Panalysical製)
40kV-50mA, Mask 15 mm,
DS:SS:RS = Program(15): Pro(15) :0.2 mm, step 0.6(s), 2° / min

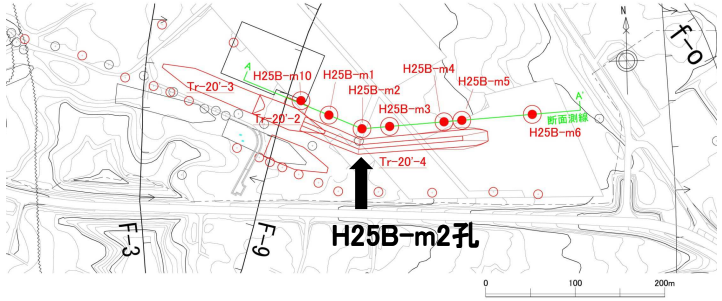
第3.3-16図(1)　泊層上部層の凝灰角礫岩の鉱物分析結果(1)

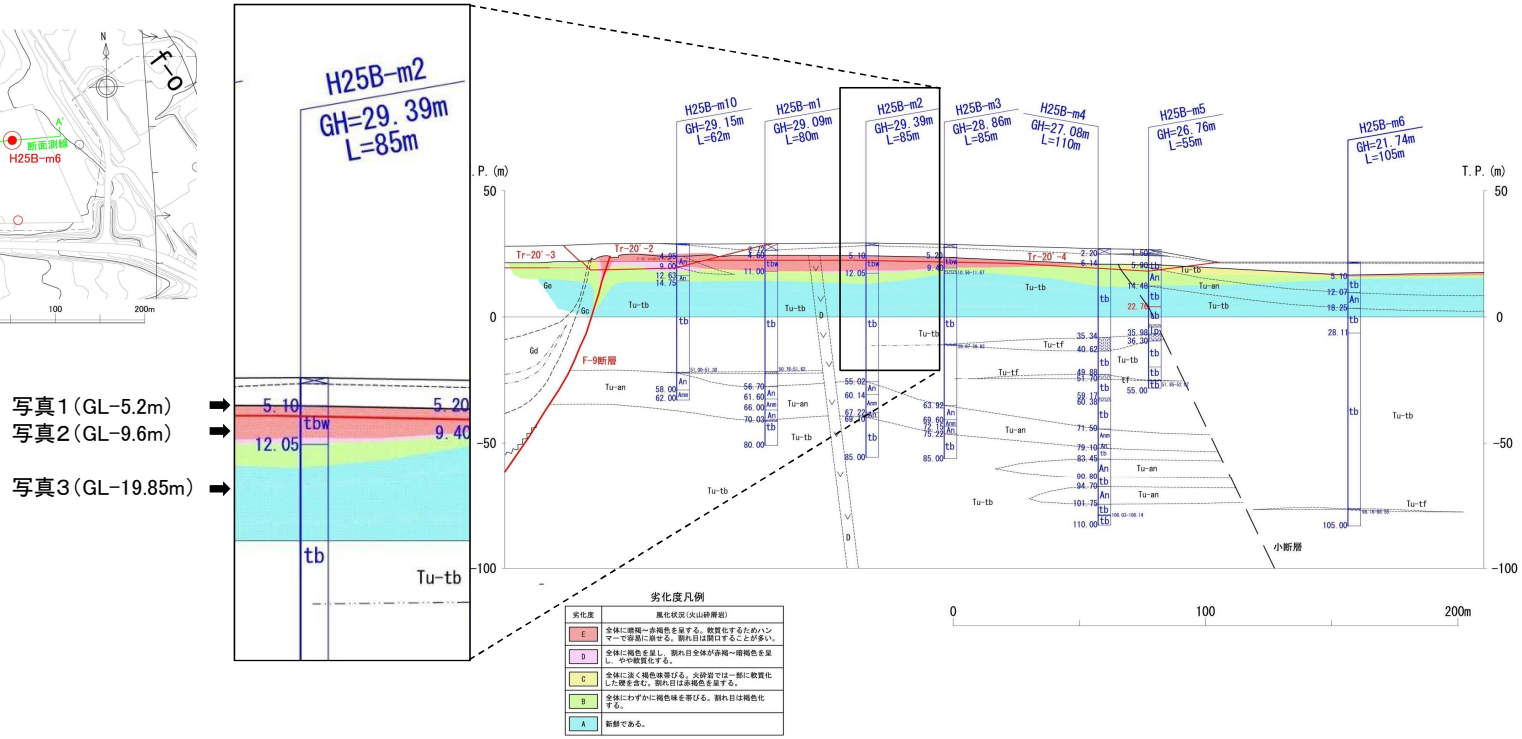


劣化度	深度(m)
E	3.12
D	3.80
D	5.84
D	7.20
C	8.72
C	9.75
A	17.55

- 泊層上部層表層9m付近までが著しく風化し，ハロイサイトが生成している。
- ハロイサイトは深部に向かって減少する傾向が認められる。
- 劣化度E～Dでは斜長石（Ca長石）がほとんど認められない。
- モンモリロナイトは8m以深から深部に増加する。
- 劣化度Cでハロイサイトとモンモリロナイトが共存する。

第3.3-16図(2) 泊層上部層の凝灰角礫岩の鉱物分析結果(2)





劣化度凡例

劣化度	風化状況(火山砕屑岩)
E	全体に暗褐～赤褐色を呈する。軟質化するためハンマーで容易に崩せる。割れ目は開口することが多い。
D	全体に褐色を呈し、割れ目全体が赤褐～暗褐色を呈し、やや軟質化する。
C	全体に淡く褐色味帯びる。火砕岩では一部に軟質化した礫を含む。割れ目は赤褐色を呈する。
B	全体にわずかに褐色味を帯びる。割れ目は褐色化する。
A	新鮮である。

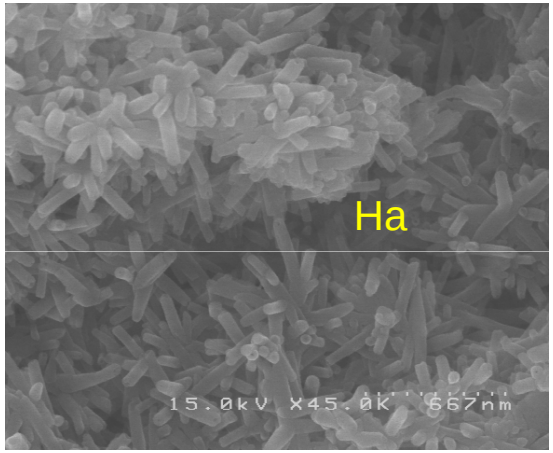
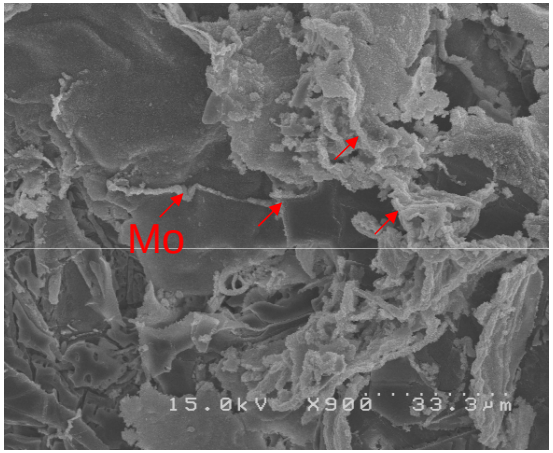
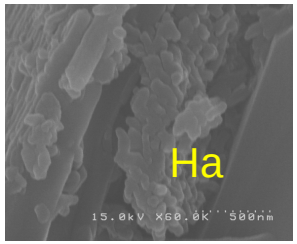


写真1 H25B-m2 (GL-5.2m)

浅所の泊層(強風化部)では岩石一面に筒状の鉱物(ハロイサイト)が沈殿生成した状況が認められる。放射状の結晶は個々が明瞭であり，長石など他の鉱物はほとんど認められない。





粘土鉱物(Mo)の表面

写真2 H25B-m2 (GL-9.6m)

鉱物(M)は基質に埋もれている。ハロイサイト(Ha)結晶は集合体となり個々の結晶は短い。粘土鉱物(モンモリナイト;Mo)の表面に未成熟なハロイサイトが認められる。

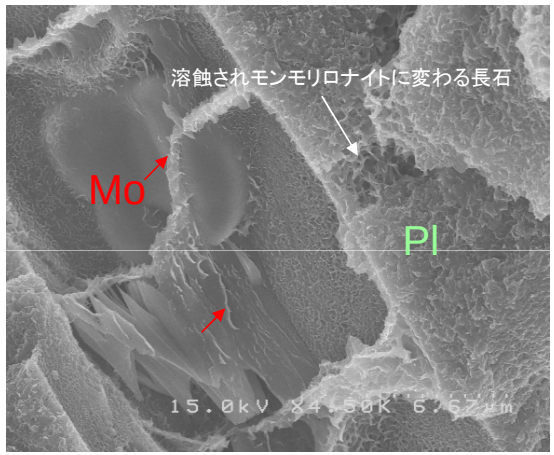
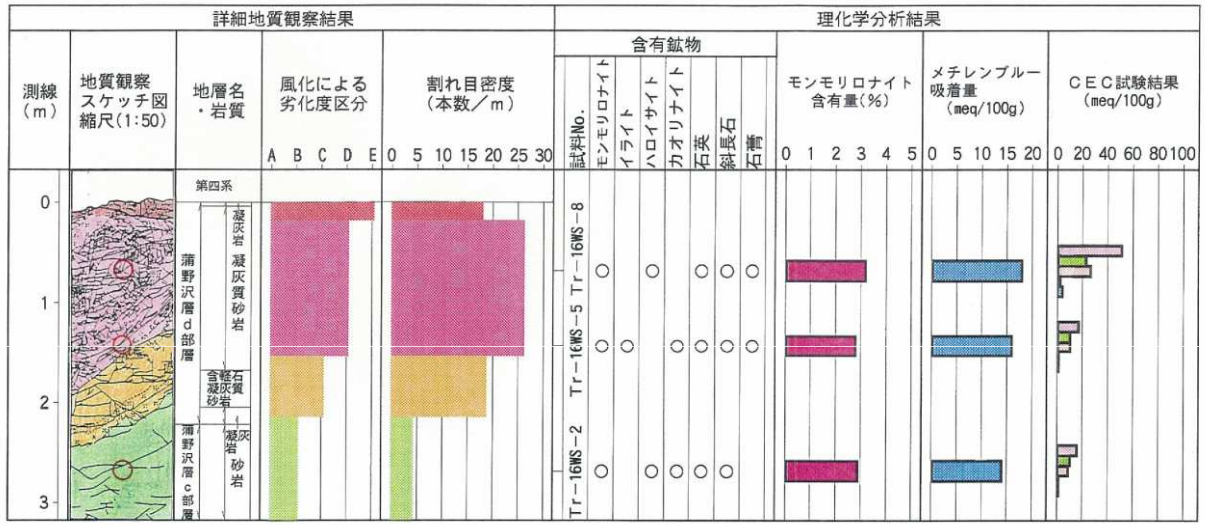


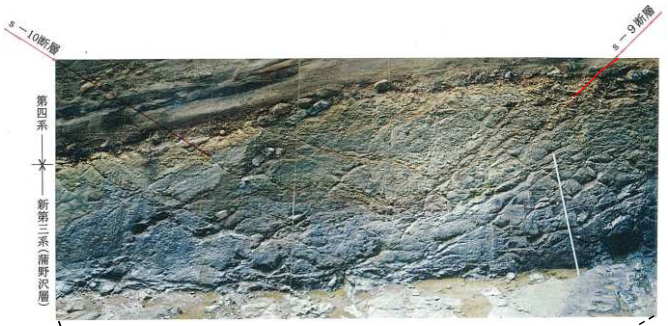
写真3 H25B-m2 (GL-19.85m)

粒子間は密である。網目状のモンモリロナイト(Mo)が粒子間を埋め，ハロイサイトは認められない。長石(Pl)がモンモリロナイトに変化する様子が認められる。

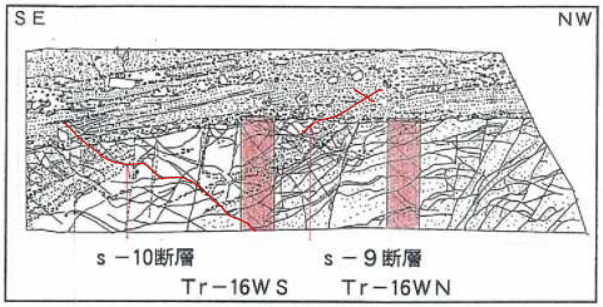
第3.3-16図(3) 泊層上部層の凝灰角礫岩の鉱物分析結果(H25B-m2孔のSEM観察結果)

Tr－16WS（S－9，S－10断層間の風化部の厚い区間）



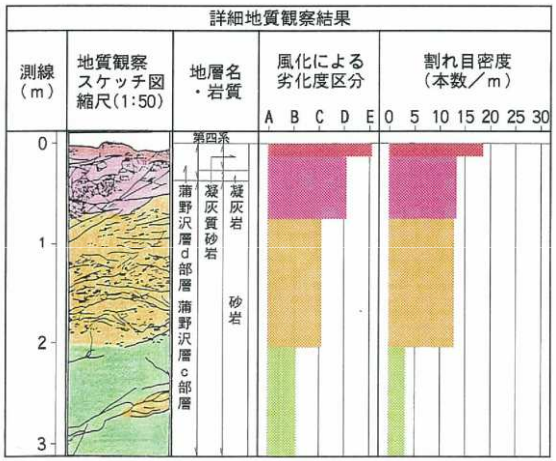


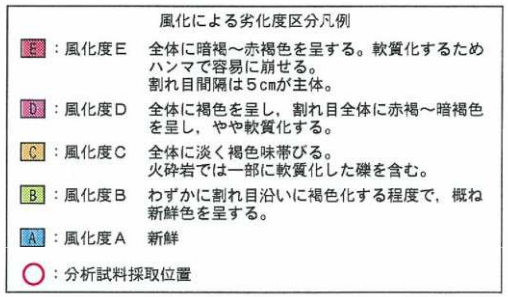
詳細地質観察位置写真

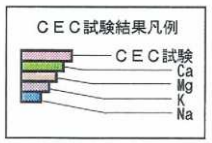


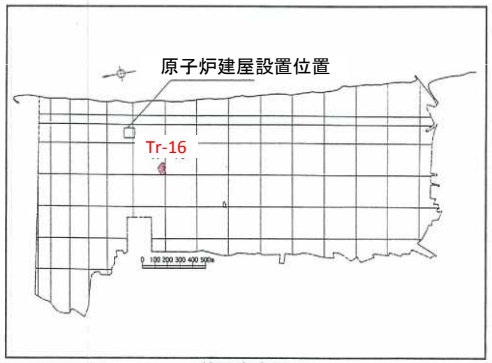
詳細地質観察位置

Tr－16WN（S－10断層北西側の風化部の薄い区間）

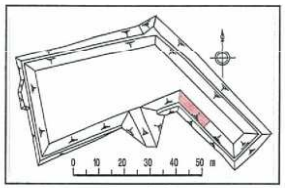








位置案内図



Tr－16全体図

第四系に変状の認められる小断層の岩盤劣化部（風化部）の性状観察及び理化学分析を実施した結果，岩盤劣化部の割れ目密度が大きく，風化が進行し，モンモリロナイトを多く含む傾向があることが確認された。

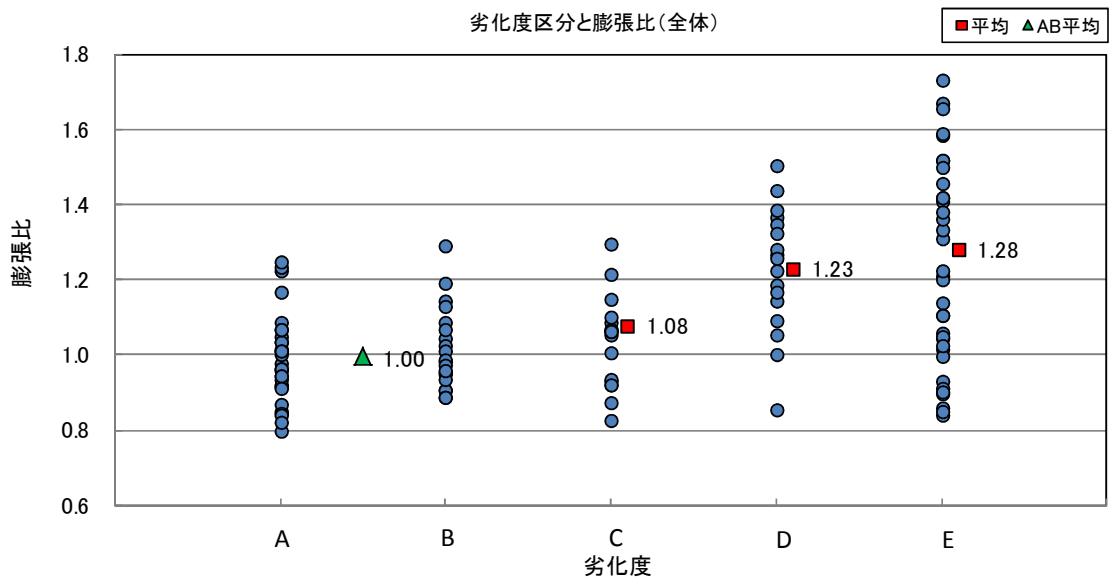
第3.3-17図　岩盤劣化部の特徴（s-9，s-10断層間の風化部の厚い区間，Tr-16トレンチ）

- 不動元素としてチタン（Ti）に着目した体積膨張比の測定を行った。
  （劣化度C，D，Eの体積膨張比を，劣化度A，Bを1としたときの比率として表現している）

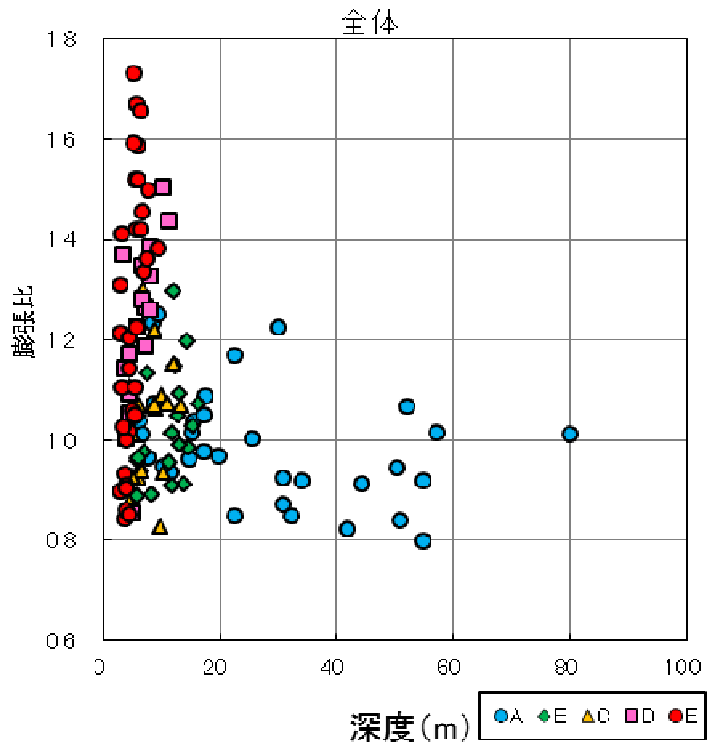
- 体積膨張比は，岩盤の劣化度と正の相関があり，浅部に分布する劣化程度の大きい領域（劣化度D，E）においては，概ね20%程度以上の体積膨張比となる。

- 体積膨張比のばらつきは全体的に大きく，劣化度Eにおいて特に大きくなっている。

膨張比の測定方法
- 湿潤試料をもちいて，湿潤密度，乾燥かさ密度等を測定。
- ガラスビード法（XRF)により全岩組成を測定。
- 単位体積中のTiO_2量を一定と仮定し，劣化度A・Bの試料に対する体積変化率を測定。

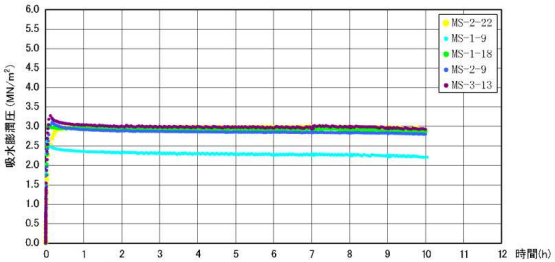


劣化度と体積膨張比の関係



深度と体積膨張比の関係

第3.3-18図　泊層上部層の凝灰角礫岩の体積膨張比

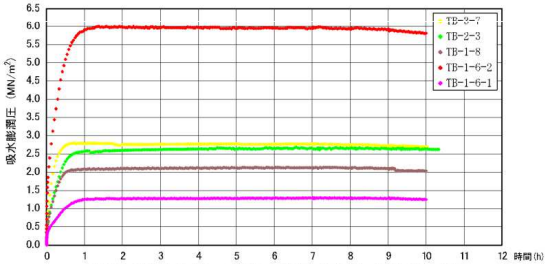


膨潤圧試験結果図（蒲野沢層 泥岩 岩盤劣化部）

蒲野沢層泥岩(MS-2-9)
試験前

蒲野沢層泥岩(MS-2-9)
試験後

【供試体の大きさ】：直径60mm，高さ20mm



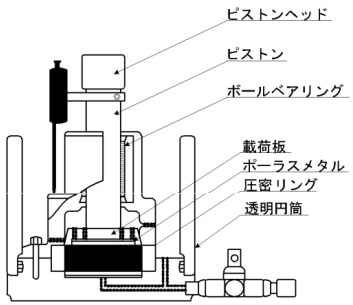
膨潤圧試験結果図（泊層 凝灰角礫岩 岩盤劣化部）

泊層凝灰角礫岩(TB-3-7)
試験前

泊層凝灰角礫岩(TB-3-7)
試験後

【供試体の大きさ】：直径60mm，高さ20mm

【膨潤圧試験の概要】
- 膨潤圧試験は，円周方向を拘束した不撹乱試料について，軸方向の体積を一定に保った状態で，乾燥状態から水浸した場合に生じる軸方向の膨潤圧を求めた。試験は，ＩＳＲＭの指針に準じた方法で実施した。
- 試験容器は，内径60mm，高さ20mm，肉厚8mmのステンレスの圧密リング，透水性の良いポーラスメタルをはめ込んだ底板，載荷盤，及びそれに連結したピストンからなる。
- 荷重の測定はロードセル（5kN）を，変位の測定にはデジタルゲージ（分解能1/1000mm）を用いた。
- 試料容器に純水を満たし，供試体に膨張量が生じないように荷重を自動調節することで，時間に伴う膨潤圧を測定した。
- なお，膨潤特性は初期含水比によって変化するため，トレンチにおける観察をもとに（岩盤上限付近では干天クラックが認められている），試験対象の泊層劣化部及び蒲野沢層劣化部について収縮定数試験によって収縮限界を把握し，それを初期含水比として試験を開始した。収縮限界の含水比は，蒲野沢層劣化部が10%（自然含水比40%），泊層劣化部が7%（自然含水比24%）である。

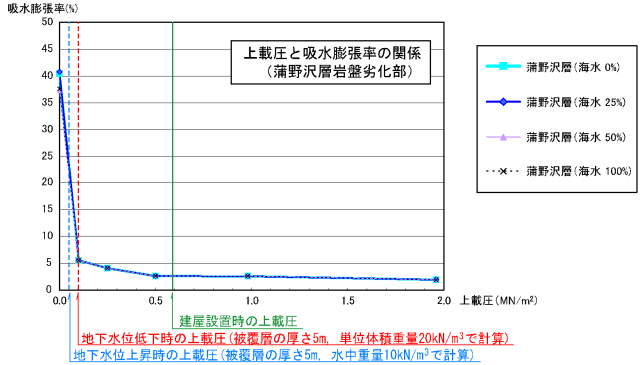


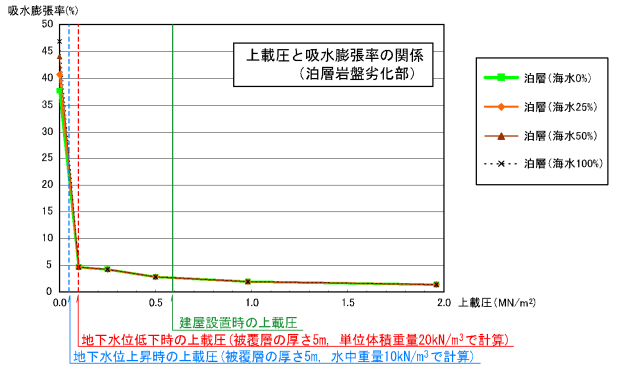
膨潤圧・膨張量試験装置

- 蒲野沢層岩盤劣化部，泊層岩盤劣化部とも，吸水によって，変状発生当時の上載圧（地下水位低下時：0.1MN/m²，地下水位上昇時：0.05M/m²）に対して，変状の発生に十分な膨潤圧が生じることを確認した。

※ 被覆層の厚さ5mの場合の上載圧は地下水位低下時で 0.1MN/m²，地下水位上昇時で 0.05MN/m² と計算される。
（被覆層の単位体積重量を 20kN/m³，水中重量を 10kN/m³ として計算）

吸水膨潤圧の時間変化図





【膨張量試験の概要】
- 膨張量試験は，円周方向を拘束した不撹乱試料について，軸方向の一定荷重を作用させた状態で，乾燥状態から水浸した場合に生じる軸方向の膨潤ひずみを求めた。試験は，ＩＳＲＭの指針に準じた方法で実施した。
- 試験装置及び供試体サイズは，左の膨潤圧試験と同様である。
- 供試体を隙間なく試験装置にセットし，あらかじめ設定した拘束圧を作用させた後，試料容器に純水を満たし，時間に伴う膨潤変位量を測定した。
- 膨潤変位量は７日間計測した。
- その後，容器内の水を濃度を調節した海水に置き換え，供試体下部から約１気圧の負圧によって海水を吸引し，供試体から吸引された水が海水に変わったことを確認した後，１日の測定を行う作業を繰り返した。

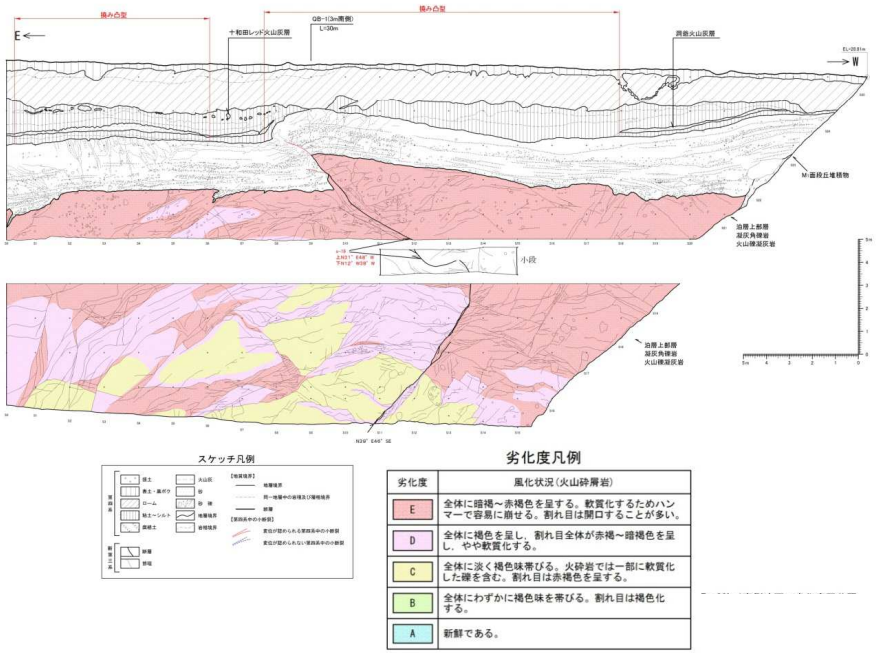
- 岩盤劣化部の吸水膨張率は，上載圧に依存する。とくに変状発生当時の被覆層厚（5m以下：地下水位低下時で約0.1MN/m² 以下，地下水位上昇時で約0.05MN/m² 以下）における低い上載圧においては，わずかな上載圧の変化で膨張率が大きく変化する。

上載圧と吸水膨張率の関係

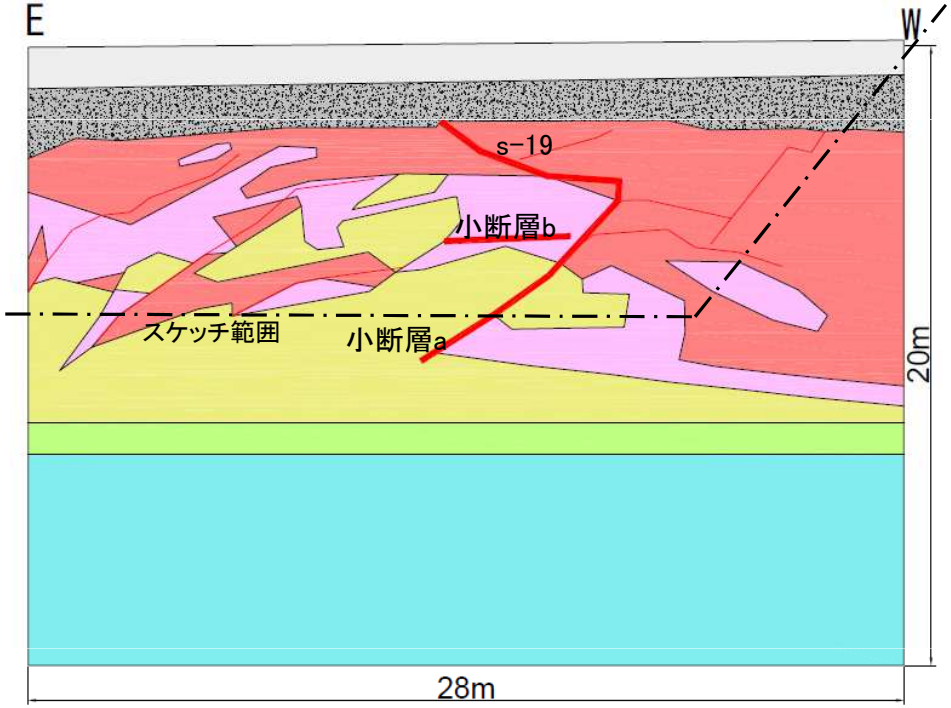
第3.3-19図　吸水膨潤圧の時間変化図と上載圧と吸水膨張率の関係

地質スケッチおよび解析用劣化区分図

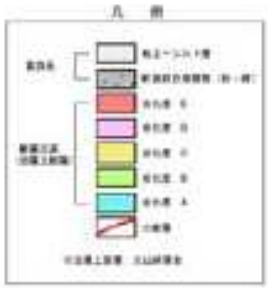
小断層s-19による新第三系（岩盤部）および第四系のずれ，撓みを変状発生前に復元したうえで，解析用劣化度区分図を作成した。



劣化度	風化状況（火山砕屑岩）
E	全体に暗褐～赤褐色を呈する。軟質化するためハンマーで容易に崩せる。割れ目は開口することが多い。
D	全体に褐色を呈し，割れ目全体が赤褐～暗褐色を呈し，やや軟質化する。
C	全体に淡く褐色味帯びる。火砕岩では一部に軟質化した礫を含む。割れ目は赤褐色を呈する。
B	全体にわずかに褐色味を帯びる。割れ目は褐色化する。
A	新鮮である。



Tr-20'-1南面　劣化度区分図



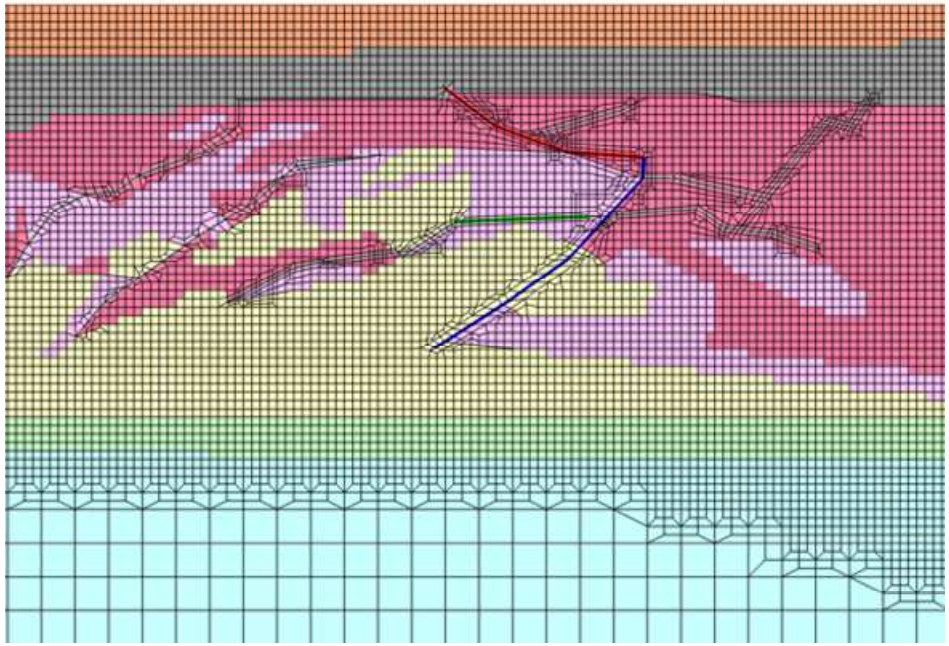
Tr-20'-1南面　解析用劣化度区分図
（変状発生前）

第3.3-20図(1)　第四系の変状の再現解析結果（小断層ｓ-19，解析条件(1)）

解析モデル図

解析用劣化度区分図を参照し，有限要素モデルを作成した。
新第三系及び第四系はソリッド要素でモデル化し，小断層はジョイント要素でモデル化した。
小断層は，最大厚さ1cm以上の粘土～シルトを挟在するものをモデル化した。

境界条件
・側面： 鉛直ローラー
・底面： 固定



第四系
- 粘土～シルト
- 砂・礫

新第三系
- 劣化度E
- 劣化度D
- 劣化度C
- 劣化度B
- 劣化度A

断層
- 小断層a
- 小断層b
- 小断層s-19

Tr-20'-1南面 解析モデル図

第3.3-20図(2) 第四系の変状の再現解析結果（小断層ｓ-19，解析条件(2)）

解析用物性値

不動元素(Ti)に着目した試料分析により，劣化度区分ごとの体積膨張比を設定した。

体積膨張比

		体積膨張比 εv ※1
新第三系	劣化度E	1.20
	劣化度D	1.20
	劣化度C	1.10
	劣化度B	1.00
	劣化度A	1.00

※1　不動元素(Ti)に着目した試料採取・分析結果を参考に，新鮮部(劣化度A・B)に対する比として設定。

小断層のモデル化厚さ

名称	トレンチ調査結果		モデル化厚さ (cm)
	挟在物	最大厚さ(cm)	
小断層a	粘土～シルト	2.0	2.0
小断層b	粘土～シルト	3.0	3.0
小断層s-19	粘土～シルト	1.0	1.0

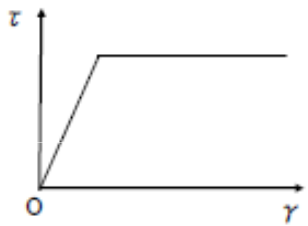
解析用物性値

土質・劣化度区分		物理特性	変形特性※3		強度特性※4	
		密度 ρ (g/cm^3)	変形係数 E (N/mm^2)	ポアソン比 ν	せん断強度 $\tau 0$ (N/mm^2)	内部摩擦角 Φ (°)
第四系※2	粘土・シルト	1.50	2	0.35	0.06	3.0
	砂	1.80	5	0.35		
新第三系	劣化度E	1.94	2040	0.30	0.43	27.0
	劣化度D	1.98				
	劣化度C	2.04				
	劣化度B	2.08				
	劣化度A	2.11				
小断層	―	―	80	0.35	0.00	27.0

※2　第四系の物理特性，変形特性は慣用値を設定(粘土・シルトN値＝3，砂N値＝8相当)。
※3　新第三系の変形係数は，劣化度Aの針貫入勾配から換算。小断層の変形係数は針貫入勾配から換算。ポアソン比は慣用値を設定。
※4　強度は原子炉設置許可時の値を利用。第四系は表土，新第三系は風化岩の強度，小断層は風化岩の残留強度を使用。

構成モデル

モールクーロン
バイリニア型
非線形弾性モデル



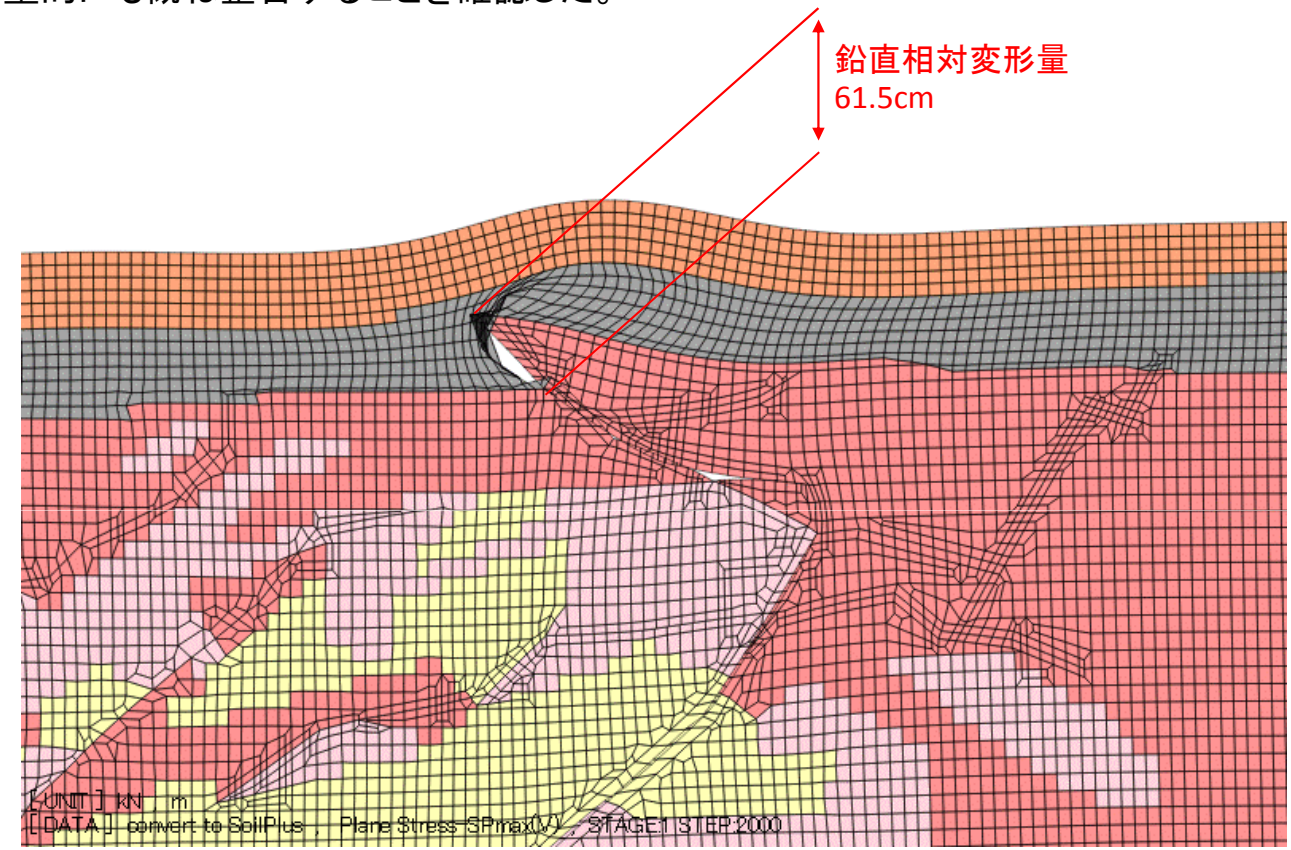
第3.3-20図(3)　第四系の変状の再現解析結果（小断層ｓ-19，解析条件(3)）

解析結果（変形図）

- 第四系の変状が岩盤劣化部の体積膨張によって発生する可能性を検討する目的で，二次元静的非線形有限要素法解析を実施した。

- 小断層s-19は開口してずれ，上部の岩塊が小断層に沿って反りあがる変形が生じており，　変形モードは実際の変状を再現していると考える。

- 解析の結果，小断層s-19において新第三系岩盤部のずれ（鉛直相対変形量）が約62cm発生した。敷地内の泊層凝灰角礫岩から測定された体積膨張率を用いたことにより，解析で得られた変形量は実際の変形量（約70cm）と量的にも概ね整合することを確認した。



Tr-20'-1南面　変形図

（変形倍率×２）

第3.3-20図(4)　第四系の変状の再現解析結果（小断層ｓ-19，解析結果）

③ 四国破砕帯の例

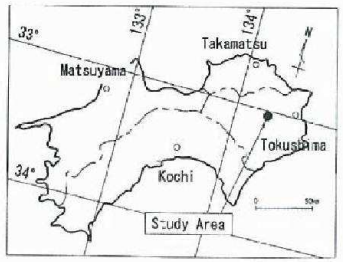
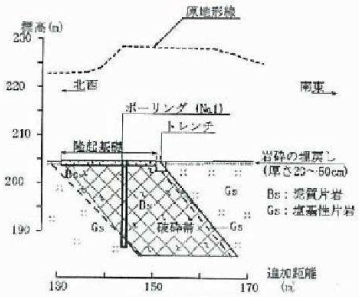


図-1 調査地点位置



(2) 地質断面図

図-3 隆起基礎部の調査孔配置と地質断面

・四国の三波川帯泥質片岩域の破砕帯に直接設置されたコンクリート基礎が，7年間で最大65mm隆起した。

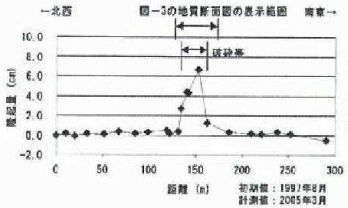


図-4 切土地盤における破砕帯箇所とその周辺の高さ変化

・基礎の隆起形状は，破砕帯の分布に関係し，破砕帯が厚く分布する南東側で約66mmと大きく，薄く分布する北西側で約27mmと小さい。

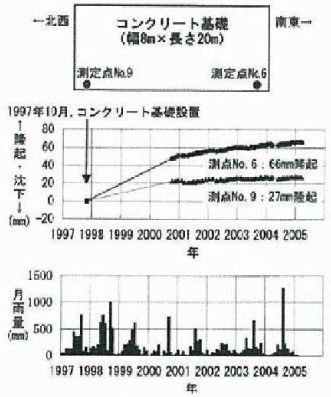


図-5 基礎隆起の経時変化

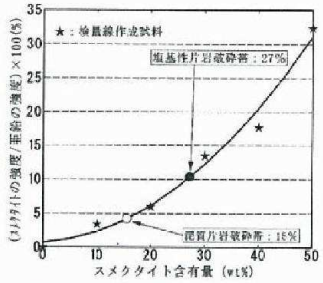
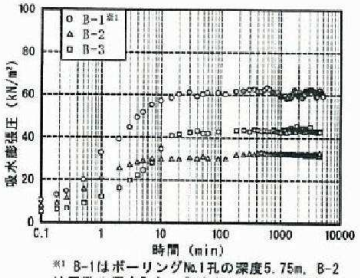


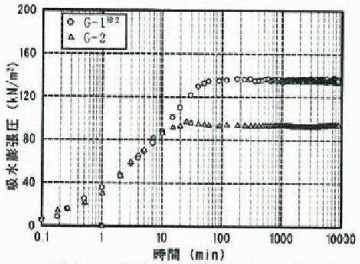
図-8 検量線および破砕帯のスメクタイト含有量

・破砕帯には 15～27%程度のスメクタイトが含まれている。



※1 B-1はボーリングNo.1孔の深度5.75m，B-2は同孔の深度5.9m，B-3は同孔の深度6.0mの試料を示す。

(1) 泥質片岩の試験例



※2 G-1，G-2はトレンチ壁面の深度1.5mから採取した試料

(2) 塩基性片岩の試験例

図-10 泥質片岩，塩基性片岩破砕帯の吸水膨張圧試験例

・破砕帯の吸水膨張圧は，泥質片岩破砕帯で約30～60kN/m²，塩基性片岩破砕帯で約90～140kN/m²であった。

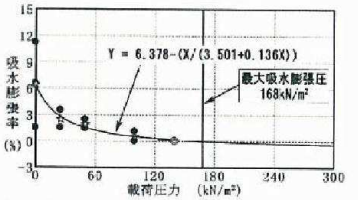


図-12 破砕帯の載荷圧力—吸水膨張率の相関

・0，25，19，98kN/m²の載荷状態で破砕帯試料を強制湿潤させて吸水膨張率を測定し，双曲線で近似して載荷圧力に対する破砕帯の吸水膨張圧を求めたところ最大168kN/m²であった。
これは土被り厚さ7.3mに相当する。

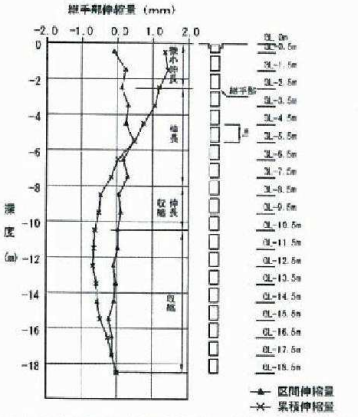


図-13 6か月間の地中変位測定による測定深度ごとの区間伸縮量と累積伸縮量

・基礎設置後4年目にボーリング孔(No.1)において，CCDカメラを用いた地中変位測定を実施した。
・設置から6ヶ月後の測定から得られた隆起深度は，継ぎ手部に伸張が認められる深度1.5～7.5mの範囲である。
・計測深度0.5mの箇所では，継ぎ手部の伸張が認められず，この時点で膨張が終了していたものと考えられる。

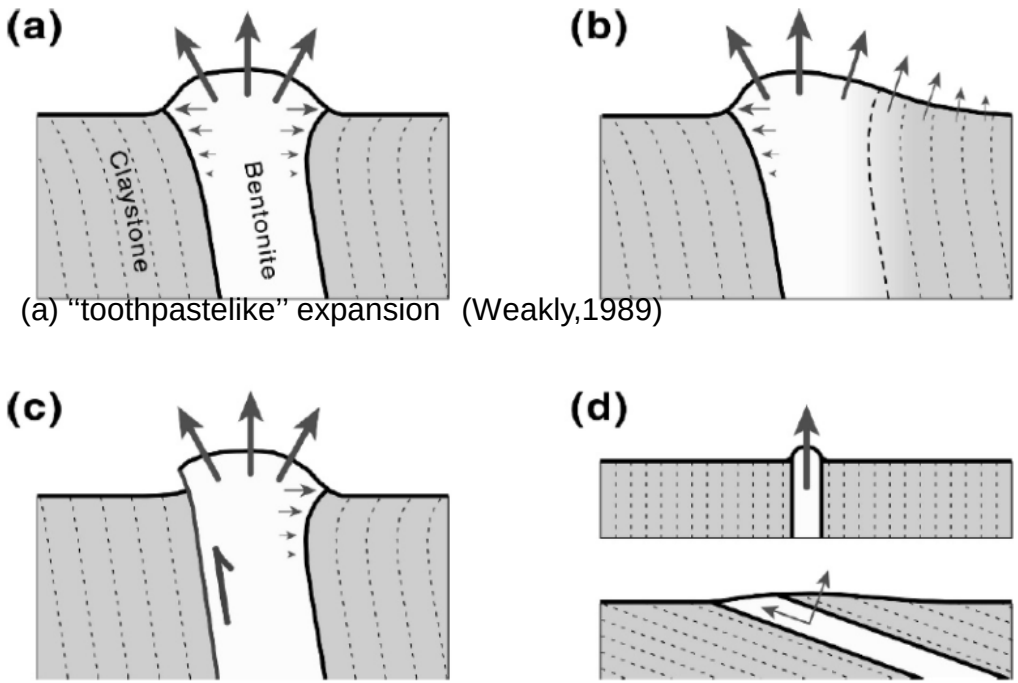
・室内試験結果による吸水膨張は短時間で終了しているが，破砕帯地盤の隆起は掘削直後から始まり6年以上継続している。
・地中変位測定からは，地表付近の膨張はすでに収束ないし収束に向かっているように見え，破砕帯の膨張が地表から地下へ除々に進行しているように見える。
・室内試験における反応速度に比較して，現地の反応速度が遅い理由としては，不飽和の破砕帯が難透水地盤であり，スメクタイトの膨潤を主体とした吸水膨張反応がゆっくりと進行していたためと推定される。
・破砕帯隆起のメカニズムは，大規模掘削による土被りの除去により，膨潤能力を有する破砕帯でスメクタイトの膨潤を主体とする吸水膨張反応が地表付近で発生し，それが除々に地下へ反応が進行し，土被り圧と膨張圧がバランスした深度で反応に収束したものと考えられる。

※ 以上，田村栄治ほか(2007)[8]による。

破砕帯に設置されたコンクリート基礎が，7年間で最大66mm隆起した事例が報告され，その原因は，破砕帯に含まれるスメクタイトの吸水膨潤反応が地下に進行したことによるとされている。

第3.3-21図　体積膨張に関する事例

コロラドの”Heaving Bedrock”



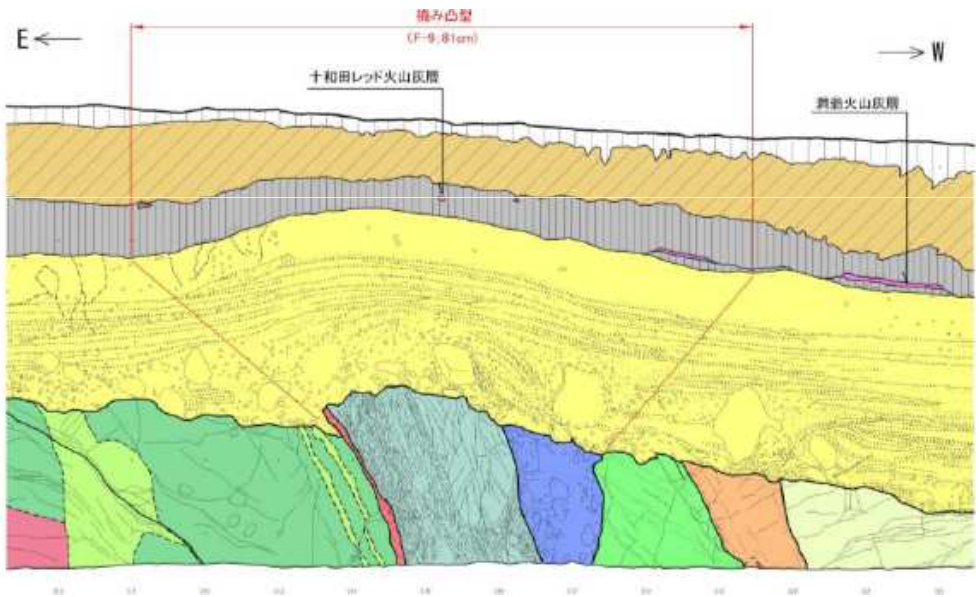
(a) “toothpastelike” expansion (Weakly,1989)

（Noe,et al., 2007, Part 3. Fig.12 ）

Figure 12. Morphologies of type I heave features resulting from hydration and swelling of bentonite beds or other highly expansive claystone zones:
(a) vertical and lateral near-surface expansion (after Weakly, 1989);
(b) sharp vs. gradational bedding contacts;
(c) beddingplane shearing;
(d) steep vs. shallow bedding dips.

東通の第四系変状

F-9断層　Tr-20’-2南面

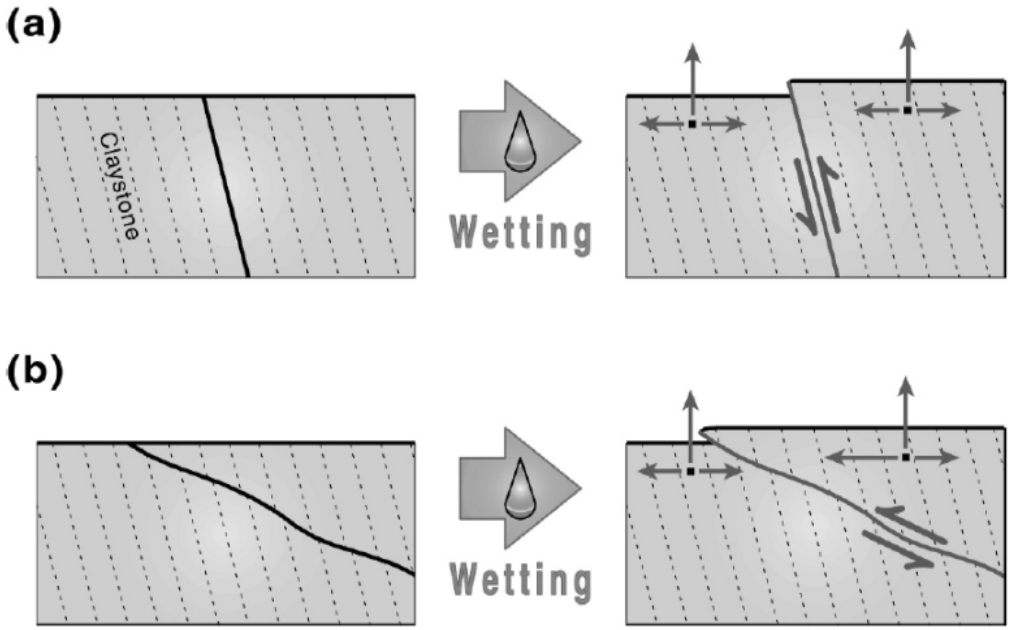


◎形態的類似性
高角度の地層が上方に突き上げるように変位・変形
（非対称または対称）

○膨張性粘土鉱物を多く含むことの類似性
（コロラド）スメクタイトを多量に含むPierre Shale
（東通）モンモリロナイト（スメクタイト）を比較的多く含む
断層破砕部

第3.3-22図(1)　体積膨張に関する米国コロラド州の事例（東通との比較(1)）

コロラドの“Heaving Bedrock”

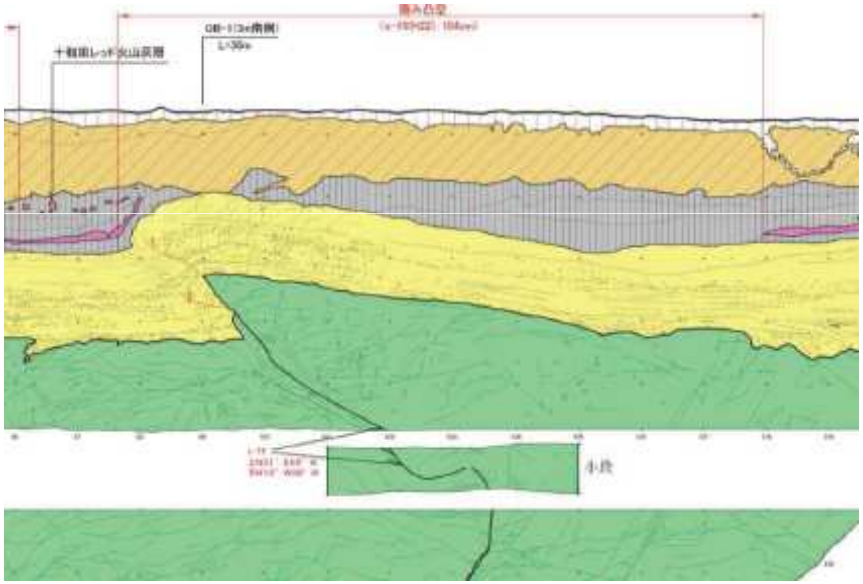


（Noe,et al., 2007, Part 3. Fig.14 ）

Figure 14. Morphologies of type II heave features resulting from hydration and swelling of adjacent claystone blocks:
(a) shearing along bedding plane; and
(b) shearing along bed-oblique shear plane.

東通の第四系変状

s-19 断層　Tr-20’-1南面

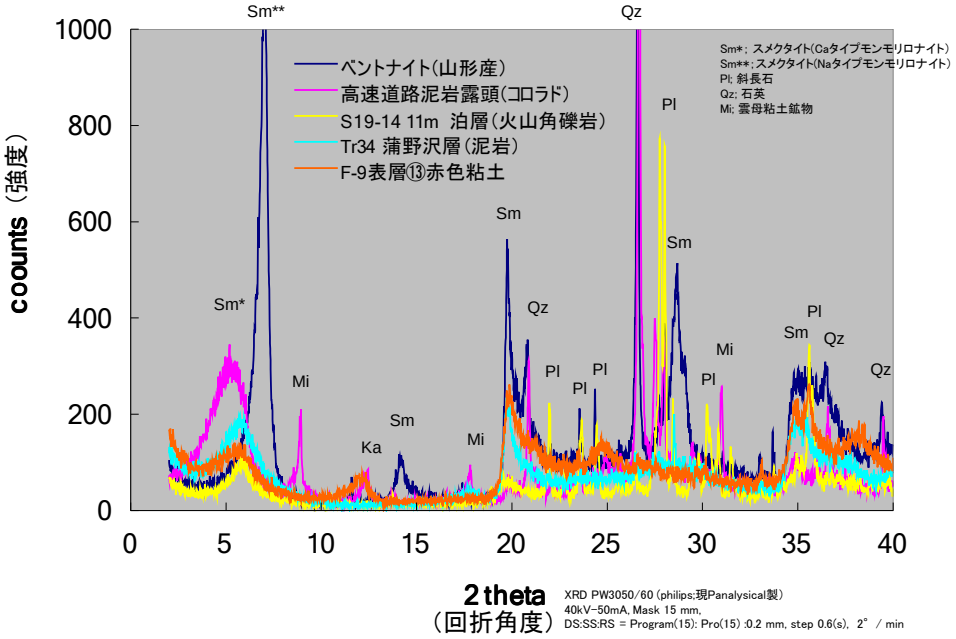


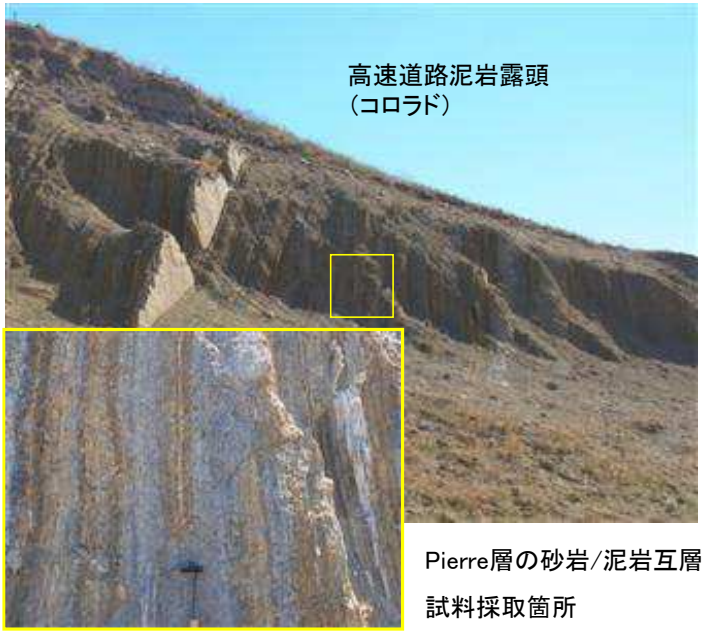
◎形態的類似性
低角度のせん断面の上盤側の岩盤が，上方だけでなく水平方向に広がり，逆断層センスのずれを生じる変位・変形（非対称）

Ti法による体積膨張量の検証結果
（浅部に分布する劣化程度の大きい領域（劣化度D，E）において概ね20%程度以上）

△メカニズムの再検討
（コロラド）スメクタイトを多量に含むPierre Shaleの体積膨張
（東通）凝灰角礫岩等に含まれる粘土鉱物（モンモリロナイト）に起因する体積膨張（膨潤）と，岩盤表層付近の風化過程で長石類が加水分解して粘土鉱物（ハロイサイト）に変化する際に生じる体積膨張が関与の可能性

膨潤性粘土について
（コロラド Heaving bedrockとの比較）





Pierre層の砂岩/泥岩互層
試料採取箇所

- ベントナイト鉱山（山形左沢）坑内では定常的に坑壁の膨潤が認められる。Naタイプのモンモリロナイト（ベントナイト）からなる。
- Pierre層の泥岩（コロラドで採取）もモンモリロナイト（Caタイプ）に富み，著しい膨潤が認められる（右図）。
- 泊層上部層，蒲野沢層風化部，でも同様にモンモリロナイトが多い傾向が認められる。
- M1面に変状を与えている凸状の赤色粘土（F-9）もモンモリロナイトが多い。

・ 第四系の変状の原因の一つとしてモンモリロナイトの膨潤がある。

第3.3-22図(3)　体積膨張に関する米国コロラド州の事例（Heaving Bedrock(1)）

コロラドの“Heaving Bedrock”の例

住宅地・道路造成後の変形の例
（West Cross Drive, Jefferson County, Colorado）

W ←　　→ E

● 波状変形を示す地盤の上昇現象の例

① 西側の2箇所の変形
- 土留めの柵が波状変形を呈している（2箇所の緩い上昇）
- Tr－20’－2～4の泊層の波状変形を示す撓みと似ている

② 東側の変形
- 駐車場の路面に，規模の大きい非対称な地盤の上昇がみられる
- 上昇量約40～50cm程度，波長約4～5m程度の上昇
- 非対称な上昇の急傾斜をなす西翼部では路盤が破断し，補修されている
- 急傾斜の西翼部の下端付近は凹地状をなし，白い帯状の水溜りの跡がみられる

第3.3-22図(4)　体積膨張に関する米国コロラド州の事例（Heaving Bedrock(2)）