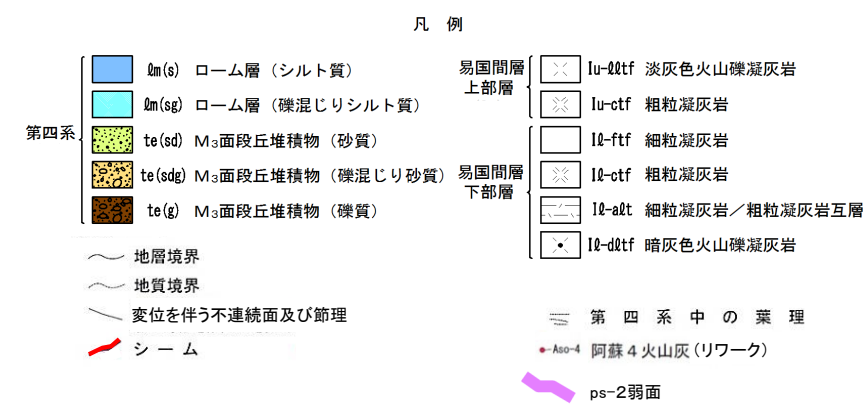
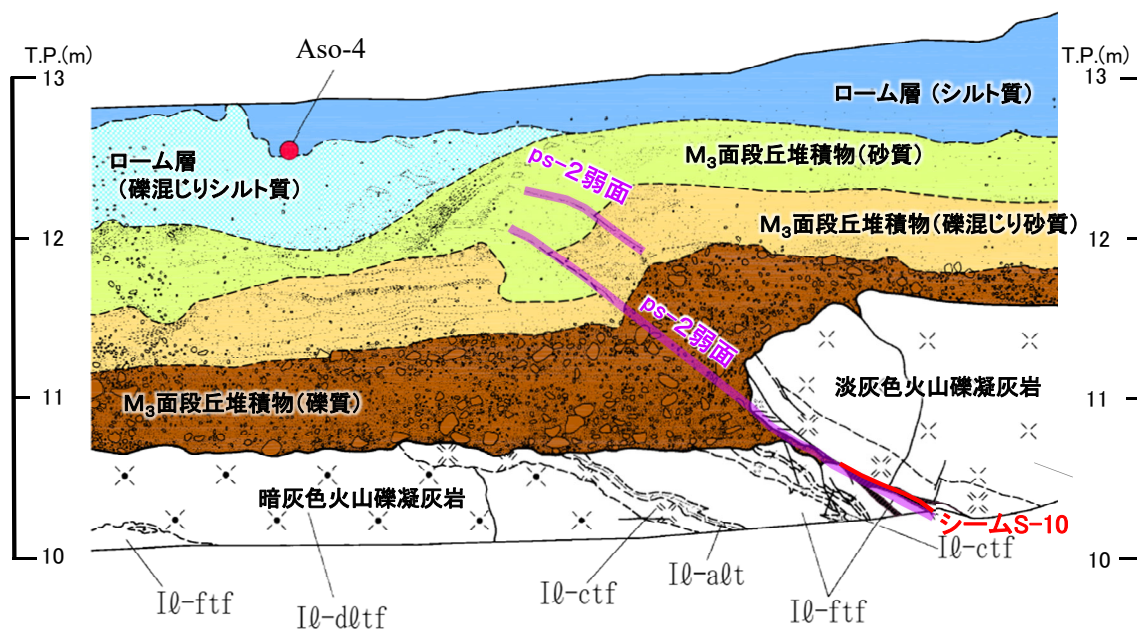




Ts-1トレンチ東側法面



- Ts-1トレンチ東側法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部及びその延長上の段丘堆積物中の不連続面にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位する。



注)位置図はP.5-11参照。

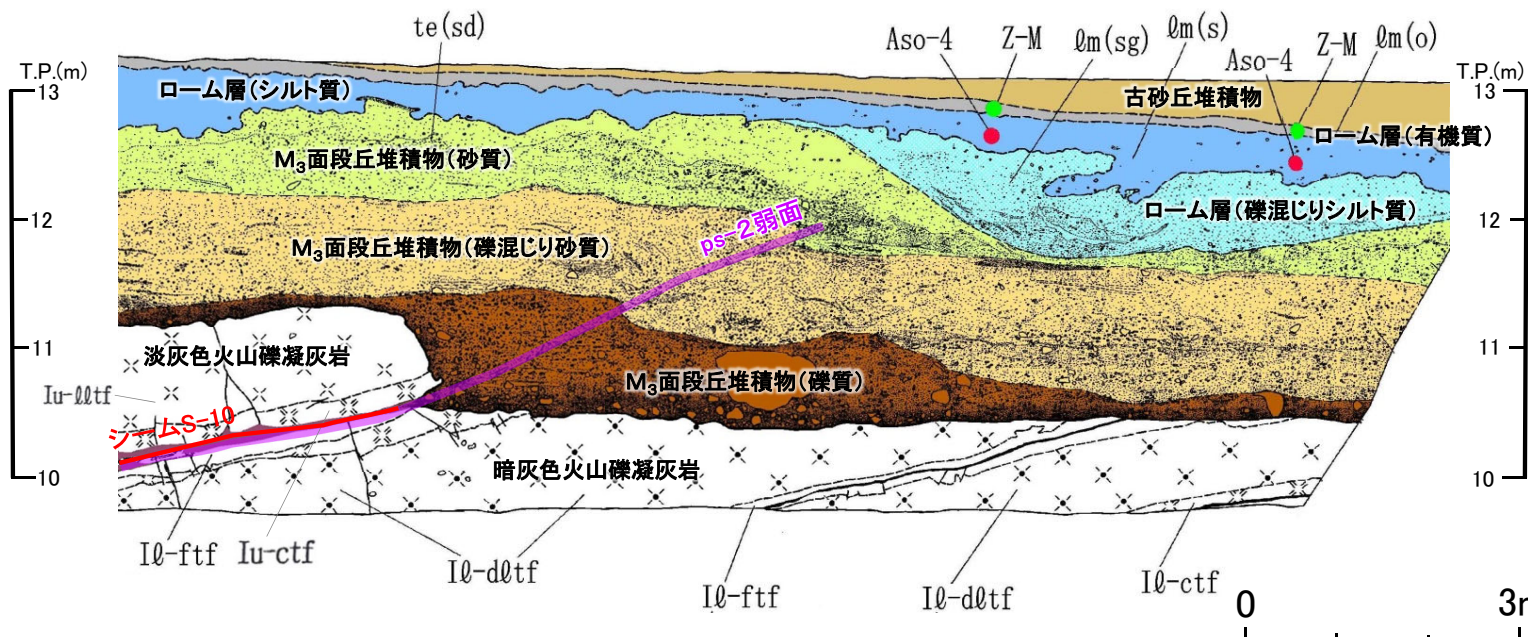




Ts-3トレンチ西側法面



- Ts-3トレンチ西側法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部及びその延長上の段丘堆積物中の不連続面にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位する。



凡例

du	古砂丘堆積物
lm(o)	ローム層(有機質)
lm(s)	ローム層(シルト質)
lm(sg)	ローム層(礫混じりシルト質)
te(sd)	M ₃ 面段丘堆積物(砂質)
te(sdg)	M ₃ 面段丘堆積物(礫混じり砂質)
te(g)	M ₃ 面段丘堆積物(礫質)
Iu-d0tf	淡灰色火山礫凝灰岩
Iu-ctf	粗粒凝灰岩
I0-ftf	細粒凝灰岩
I0-ctf	粗粒凝灰岩
I0-d0tf	暗灰色火山礫凝灰岩

地層境界
 地質境界
 変位を伴う不連続面及び節理
 第四系中の葉理

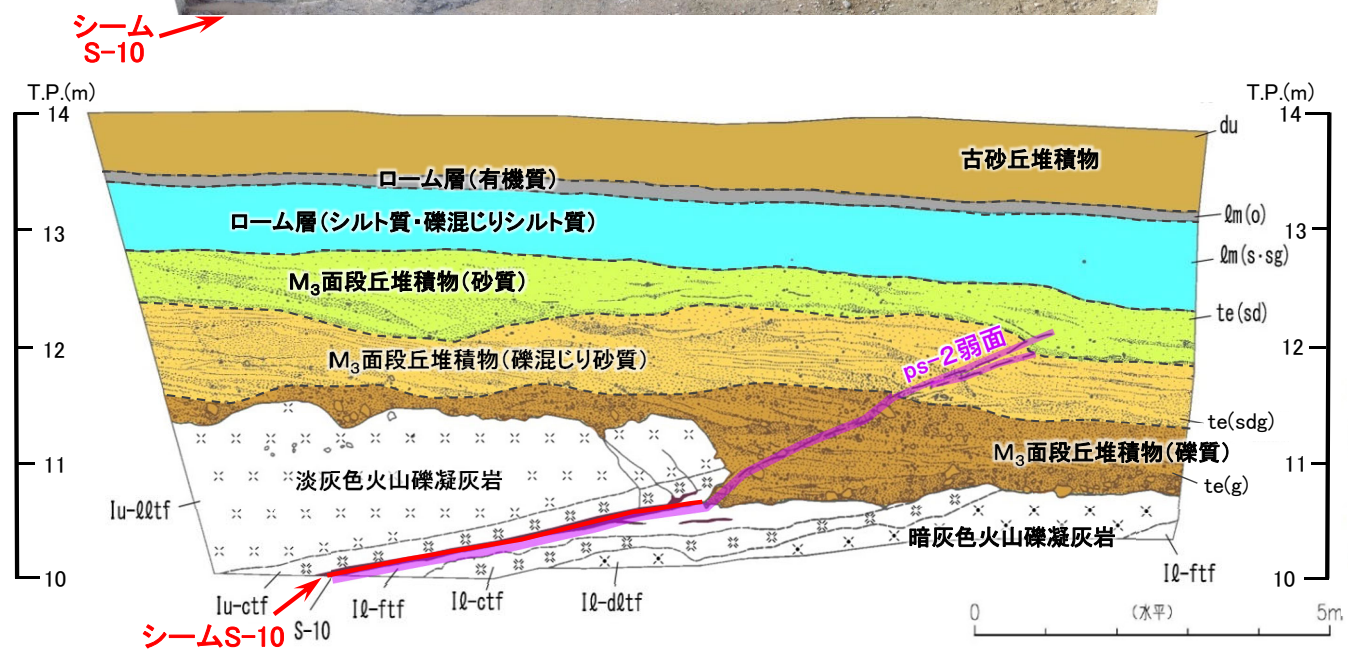
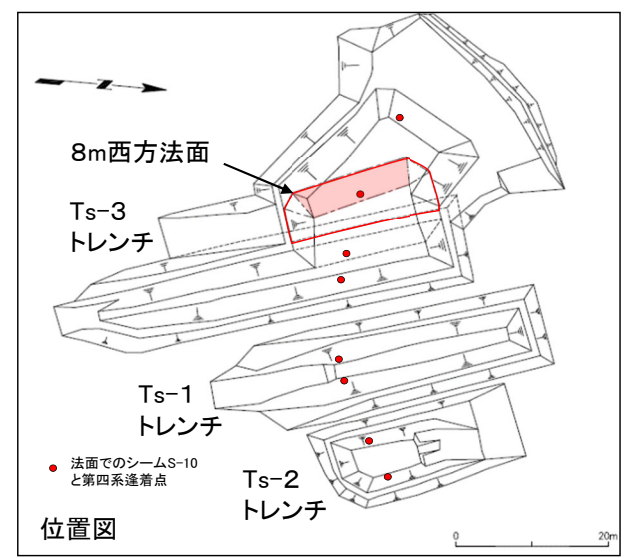
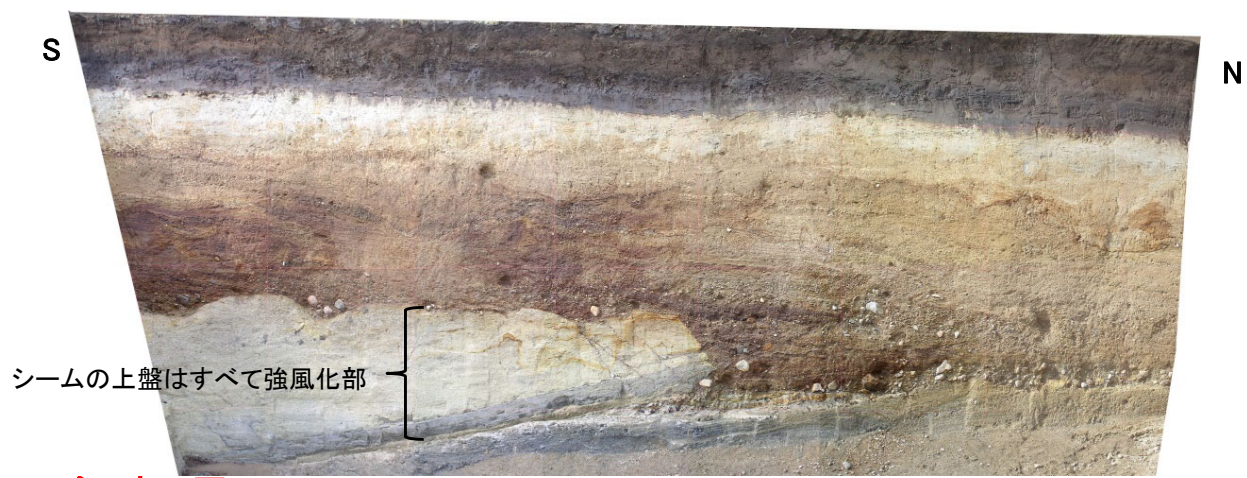
シーム S-10
 Z-M 銭亀女那川火山灰(リワーク)
 Aso-4 阿蘇4火山灰(リワーク)
 ps-2弱面

注)位置図はP.5-11参照。

5.2 変状弱面の分布・性状(17/20)



Ts-3トレンチ8m西方法面



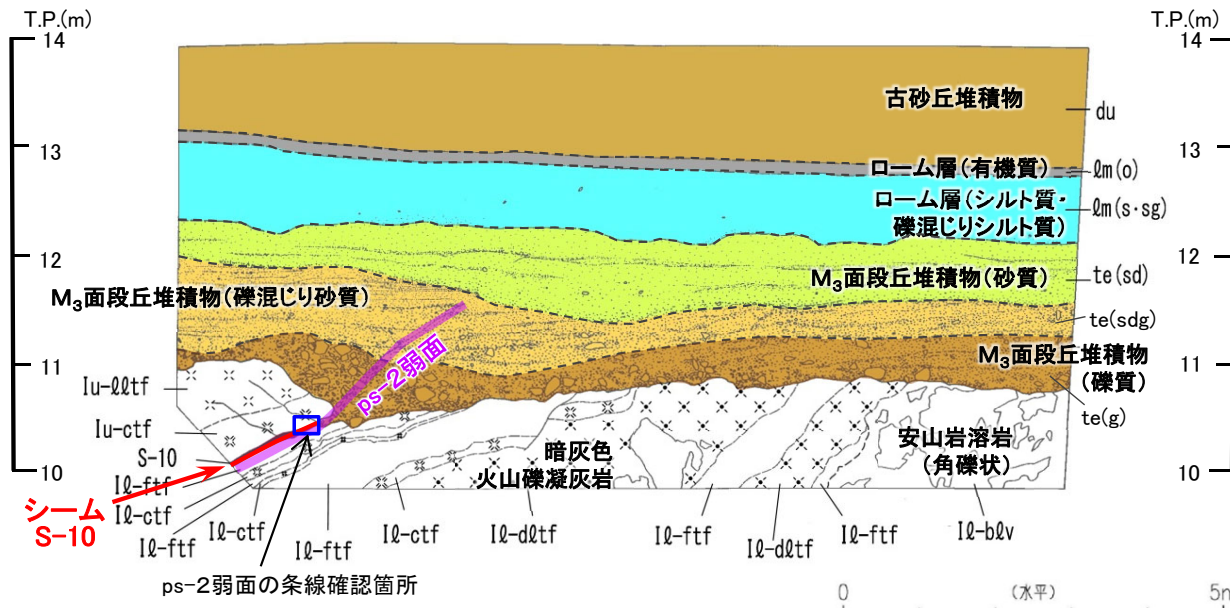
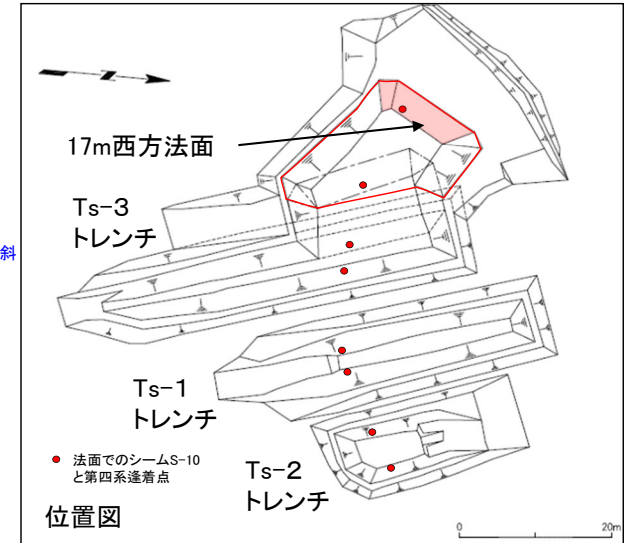
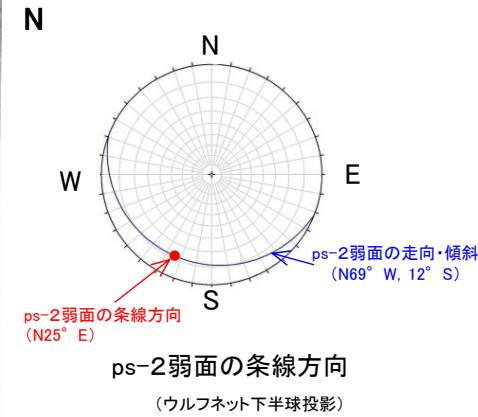
凡例 注)位置図はP.5-11参照。

du	古砂丘堆積物	~~~~~	地層境界
qm(o)	ローム層(有機質)	~~~~~	地質境界
qm(s·sg)	ローム層(シルト質・礫混じりシルト質)	~~~~~	変位を伴う不連続面及び節理
te(sd)	M ₃ 面段丘堆積物(砂質)	~~~~~	第四系中の葉理
te(sdg)	M ₃ 面段丘堆積物(礫混じり砂質)	~~~~~	
te(g)	M ₃ 面段丘堆積物(礫質)	~~~~~	
Iu-qtz	淡灰色火山礫凝灰岩	~~~~~	シーム
Iu-ctf	粗粒凝灰岩	~~~~~	ps-2弱面
Iq-ftf	細粒凝灰岩		
Iq-ctf	粗粒凝灰岩		
Iq-dqtf	暗灰色火山礫凝灰岩		

- Ts-3トレンチ8m西方法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部及びその延長上の段丘堆積物中の不連続面にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位する。



Ts-3トレンチ17m西方法面



凡例

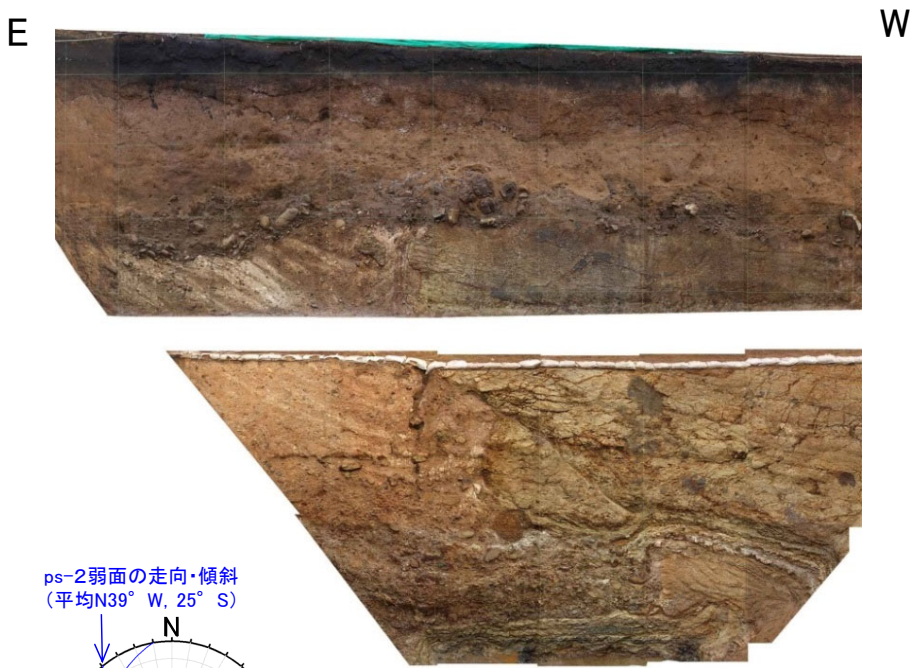
注)位置図はP.5-11参照。

du	古砂丘堆積物	~~~~~	地層境界
Qm(o)	ローム層(有機質)	~~~~~	地質境界
Qm(s·sg)	ローム層(シルト質・礫混じりシルト質)	~~~~~	変位を伴う不連続面及び節理
te(sd)	M ₃ 面段丘堆積物(砂質)	~~~~~	第四系中の葉理
te(sdg)	M ₃ 面段丘堆積物(礫混じり砂質)	~~~~~	
te(g)	M ₃ 面段丘堆積物(礫質)	~~~~~	
Iu-Qltf	淡灰色火山礫凝灰岩	~~~~~	シーム
Iu-ctf	粗粒凝灰岩	~~~~~	ps-2弱面
Iq-ftf	細粒凝灰岩		
Iq-ctf	粗粒凝灰岩		
Iq-dltf	暗灰色火山礫凝灰岩		
Iq-blv	安山岩溶岩(角礫状)		

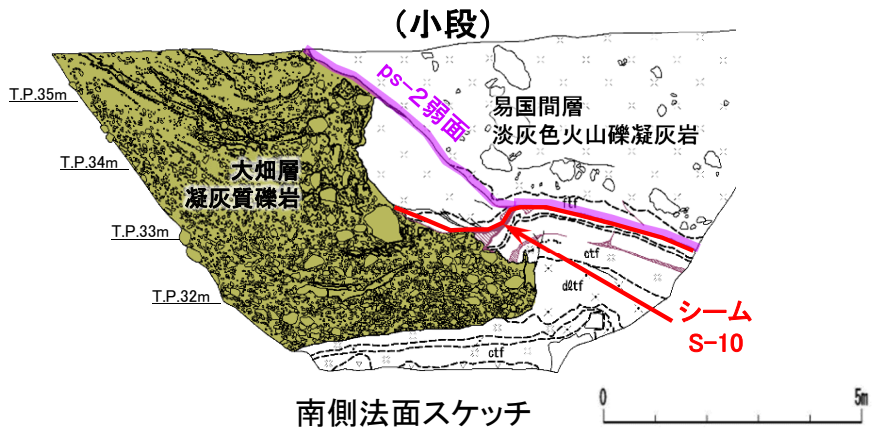
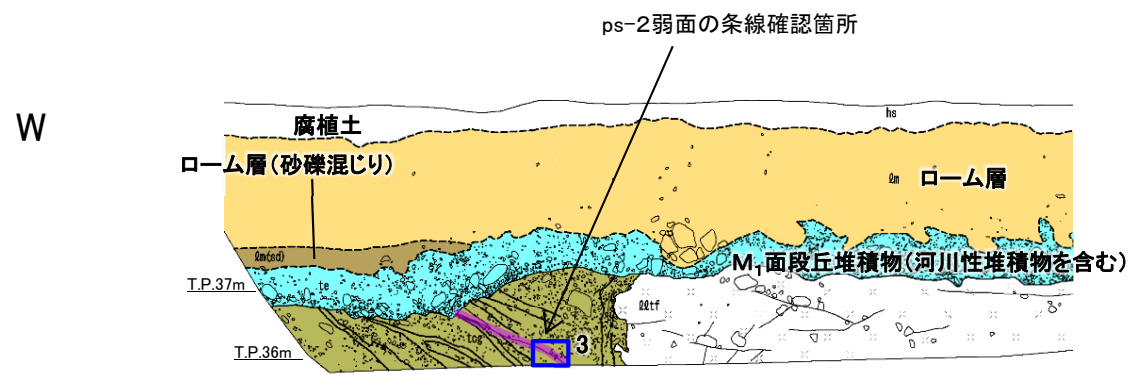
- Ts-3トレンチ17m西方法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部及びその延長上の段丘堆積物中の不連続面にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位し、傾斜方向に明瞭な条線が認められる。



Ts-10トレンチ南側法面

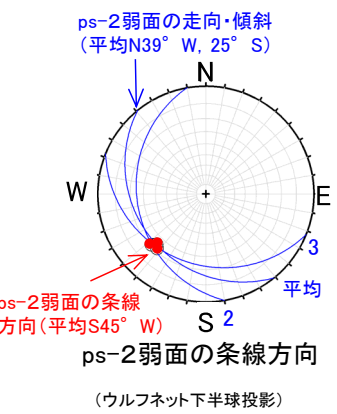


南側法面写真



南側法面スケッチ

注)位置図はP.5-11参照。



(P.2-55の北側法面のps-2弱面測定箇所No.2との平均)

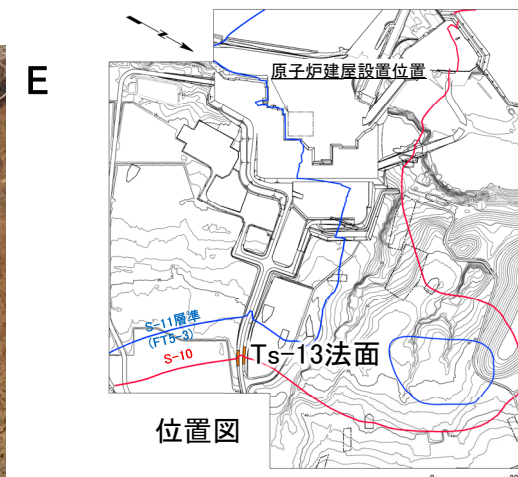
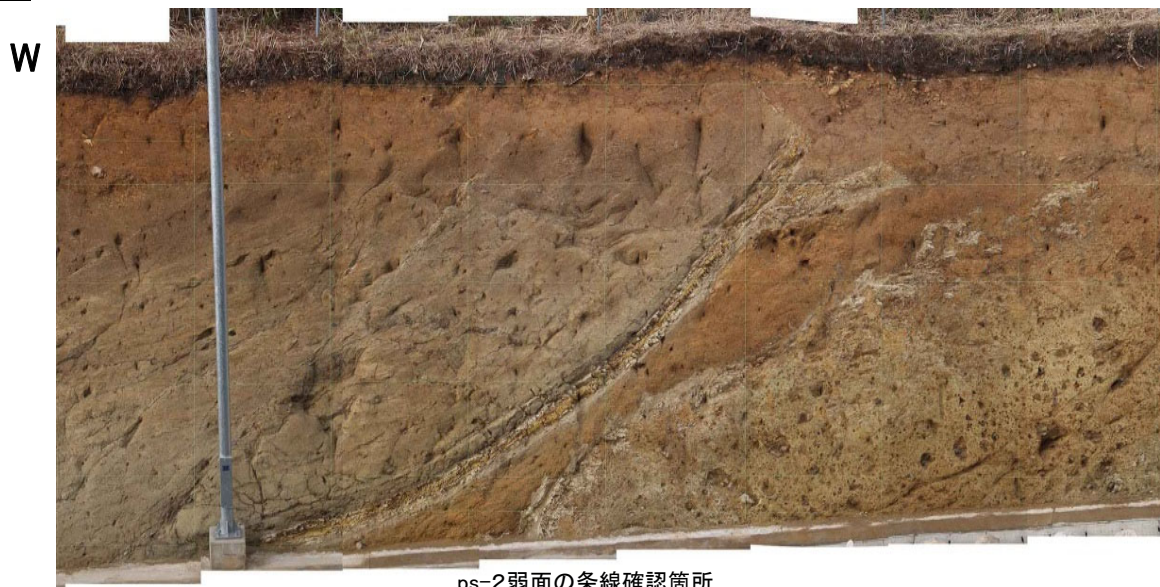
凡例

hs 腐植土	易国間層 上部層 dltf 淡灰色火山礫凝灰岩 (強風化部)	地層境界	シーム
qm ローム層	dltf 暗灰色火山礫凝灰岩	地質境界	シーム(岩片を含む)
qm(sd) ローム層(砂礫混じり)	易国間層 下部層 ftf/ctf 細粒凝灰岩・粗粒凝灰岩互層	変位を伴う不連続面及び節理	礫
te M1面段丘堆積物 (河川性堆積物を含む)	ftf 細粒凝灰岩	葉理	ps-2弱面
tcg 凝灰質礫岩	b&v 安山岩溶岩(角礫状)	葉理(軽石)	

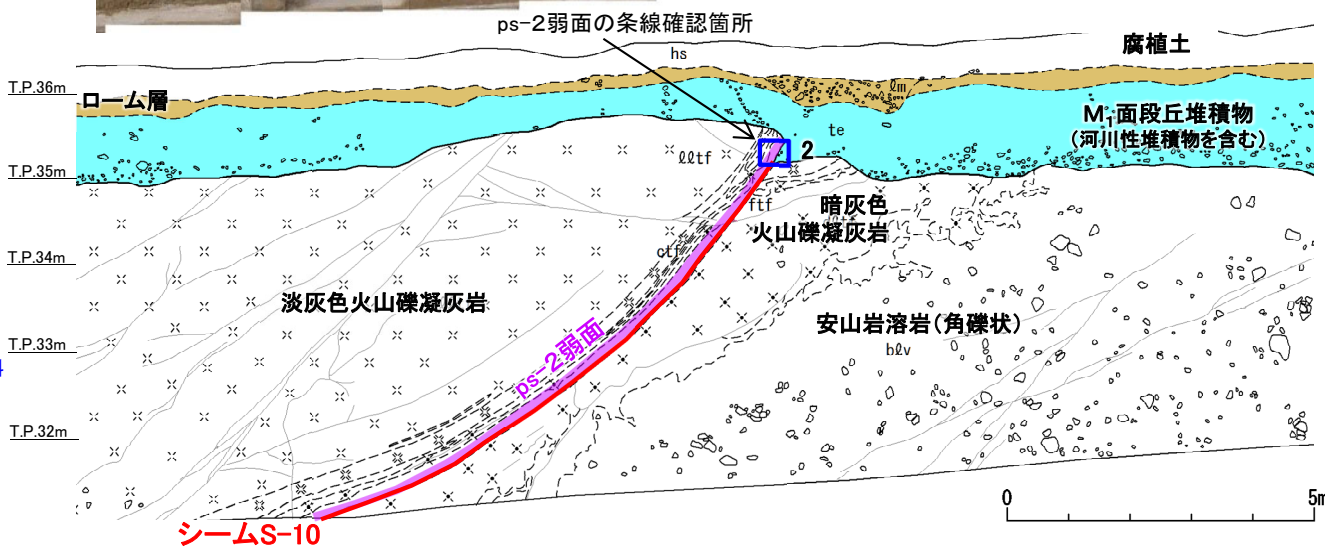
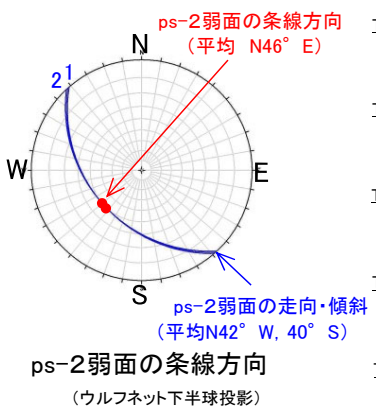
- Ts-10トレンチ南側法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部及びその延長上の大畑層中の不連続面にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位し、傾斜方向に明瞭な条線が認められる。



Ts-13北側法面



位置図
注) シームS-11層準(FT5-3*)の位置は各トレンチ・法面での調査結果に基づく。
* 1: シームS-11を挟む細粒凝灰岩の變層名。
凡例



hs	腐植土
qm	ローム層
te	M ₁ 面段丘堆積物 (河川性堆積物を含む)
qltf	淡灰色火山礫凝灰岩
otf	粗粒凝灰岩
dltf	暗灰色火山礫凝灰岩
ftf	細粒凝灰岩
blv	安山岩溶岩 (角礫状)
~~~~~	地層境界
~~~~~	地質境界
~~~~~	変位を伴う不連続面及び節理
~~~~~	段丘堆積物中の不連続面
~~~~~	シーム
○	礫
~~~~~	ps-2弱面

- Ts-13北側法面では、シーム付近の強風化部において、シームS-10の一部にps-2弱面が分布する。
- ps-2弱面上盤の強風化部はps-2弱面に接する。
- ps-2弱面は、上盤が上方に変位し、傾斜方向に明瞭な条線が認められる。

ボーリングコア観察結果

[本編資料4.1章(3)に関する基礎データ]

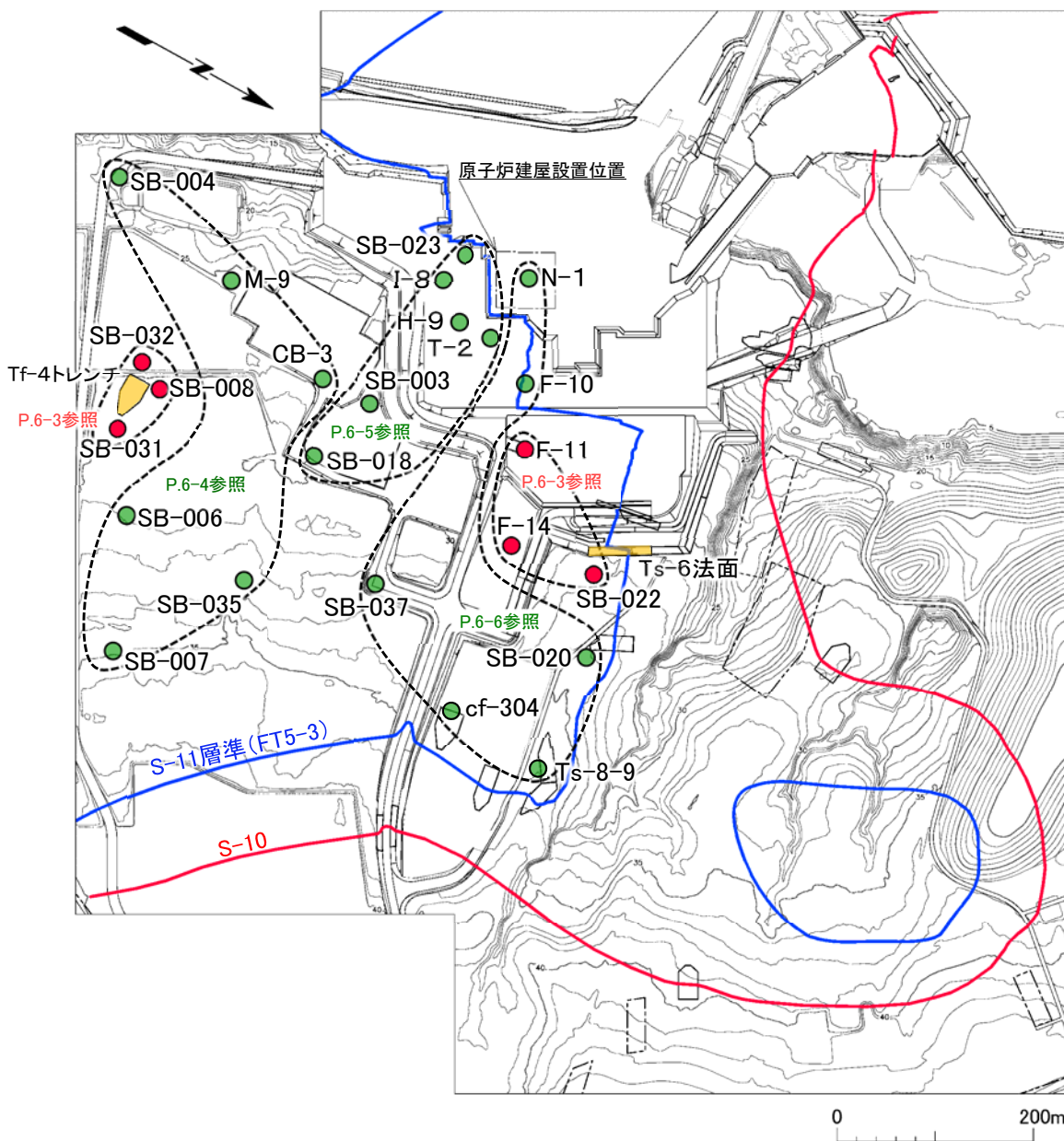
- シームS-10及びシームS-11付近の主に易国間層上部層中に認められる成層構造が発達する部分及び低角の変位を伴う不連続面の分布を確認した結果を示す。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(2/18)

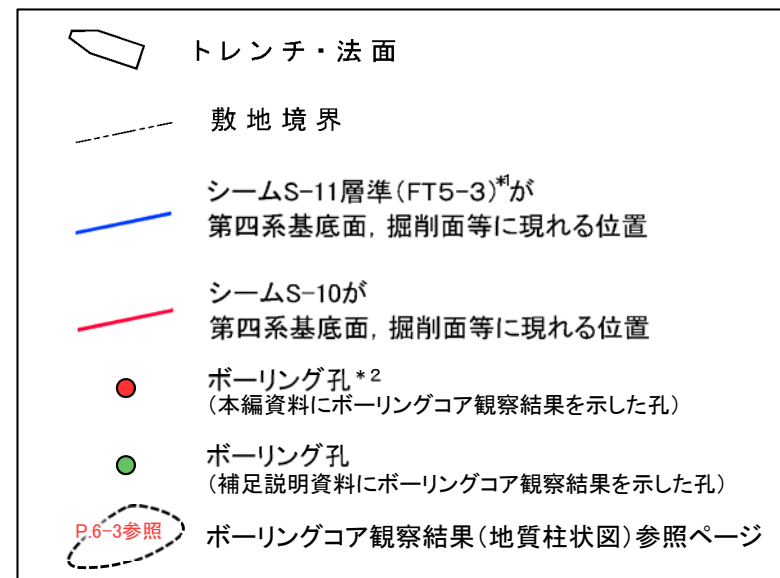
第804回審査会合
資料1-1 P.4-66 一部修正

コメントNo.S2-136

観察対象としたボーリング孔の位置



凡例



*1: シームS-11を挟む細粒凝灰岩の鍵層名。

*2: 変状が認められるTs-6法面付近の3孔及び易国間層上部層が最も厚く分布し、易国間層上部層全体の低角の変位を伴う不連続面の分布等が確認できるTf-4トレンチ付近の3孔の計6孔のボーリングコア観察結果については、本編資料P.4-41～P.4-44に示した。

- 観察の対象としたボーリング孔は、敷地内のシームS-11層準が分布する範囲から選定した計24孔である。
- ボーリングコア観察結果(地質柱状図)をP.6-3～P.6-6に示す。
- 観察対象とした24孔の地質柱状図及びコア写真は机上配布資料に示す。

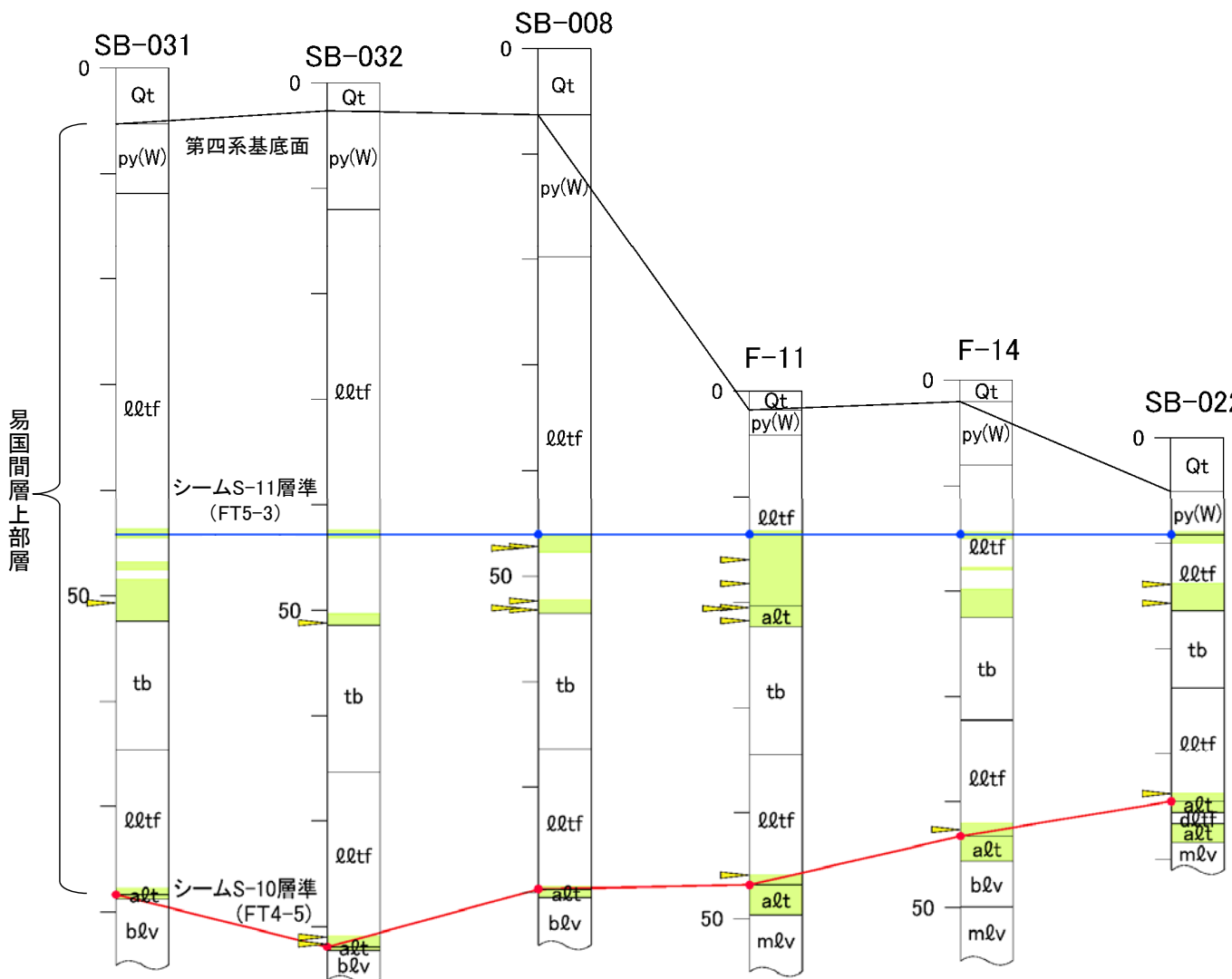


ボーリングコア観察結果(地質柱状図)(1/4)

コメントNo.S2-136

凡例

Qt	第四系(腐植土,ローム,段丘堆積物),埋土	
py(W)	火山碎屑岩(風化部) (淡灰色火山礫凝灰岩(風化部))	
lltf	淡灰色火山礫凝灰岩	低角の変位を伴う不連続面
alt	細粒凝灰岩, 淡灰色火山礫凝灰岩, 粗粒凝灰岩	成層構造が発達する部分
tb	凝灰角礫岩	第四系基底面
alt	細粒凝灰岩, 粗粒凝灰岩, 暗灰色火山礫凝灰岩	シームS-11層準(FT5-3) (青丸はシームS-11)
dltf	暗灰色火山礫凝灰岩	シームS-10層準(FT4-5) (赤丸はシームS-10)
bLv	安山岩溶岩(角礫状)	
mLv	安山岩溶岩(塊状)	



注) 本図ではシームS-11の層準を基準として地質柱状図を南北に並べて対比。

- 低角の変位を伴う不連続面*は、シームS-10, S-11の層準付近の成層構造が発達する部分に分布が限定され、各シームから離れた淡灰色火山礫凝灰岩(lltf)、凝灰角礫岩(tb)及び安山岩溶岩(bLv, mLv)中には認められない。
- 低角の変位を伴う不連続面は、主としてシームS-11層準(FT5-3)付近の下盤の成層構造が発達する部分に分布する。
- また、成層構造が発達する部分の分布範囲は、下限が凝灰角礫岩の上面で、上限は主としてシームS-11層準(FT5-3)である。
- 易国間層上部層が厚く分布し、シームS-11が分布するSB-008孔のボーリングコア観察結果(コア写真)は本編資料P.4-43, 4-44に示す。他の5孔についてはP.6-7~P.6-18に示す。

低角の変位を伴う不連続面の分布とシーム及び成層構造が発達する部分との関係

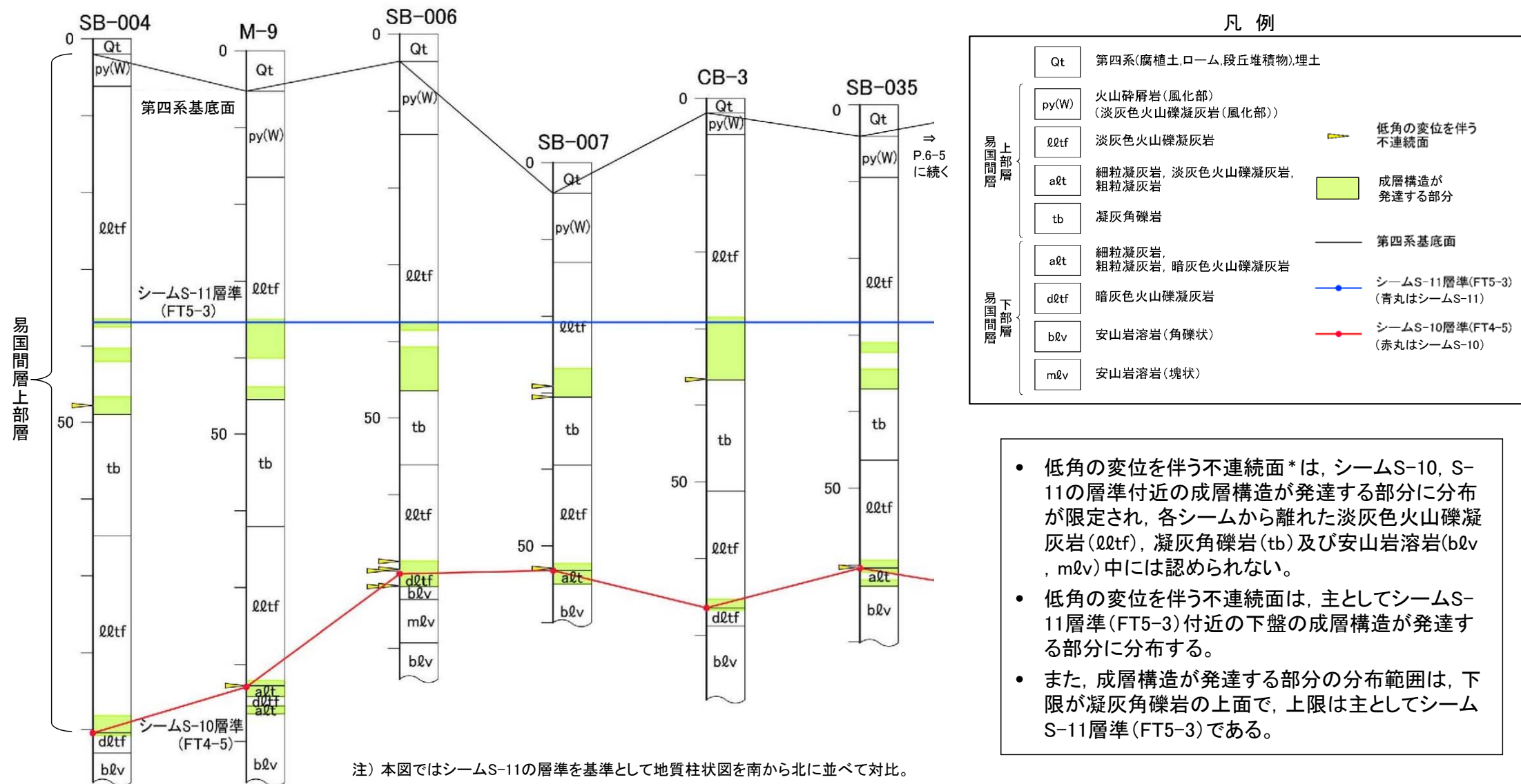
*: ボーリングコアではトレンチ調査と異なり、変位量の判定が困難で、条線も不明瞭なものが多いことから、面が平滑で低角(50°以下)の断裂を保守的に「低角の変位を伴う不連続面」とする。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(4/18)

コメントNo.S2-136



ボーリングコア観察結果(地質柱状図) (2/4)



- 低角の変位を伴う不連続面*は、シームS-10、S-11の層準付近の成層構造が発達する部分に分布が限定され、各シームから離れた淡灰色火山礫凝灰岩(lltf)、凝灰角礫岩(tb)及び安山岩溶岩(blv, mlv)中には認められない。
- 低角の変位を伴う不連続面は、主としてシームS-11層準(FT5-3)付近の下盤の成層構造が発達する部分に分布する。
- また、成層構造が発達する部分の分布範囲は、下限が凝灰角礫岩の上面で、上限は主としてシームS-11層準(FT5-3)である。

*:ボーリングコアではトレンチ調査と異なり、変位量の判定が困難で、条線も不明瞭なものが多いことから、面が平滑で低角(50°以下)の断裂を保守的に「低角の変位を伴う不連続面」とする。

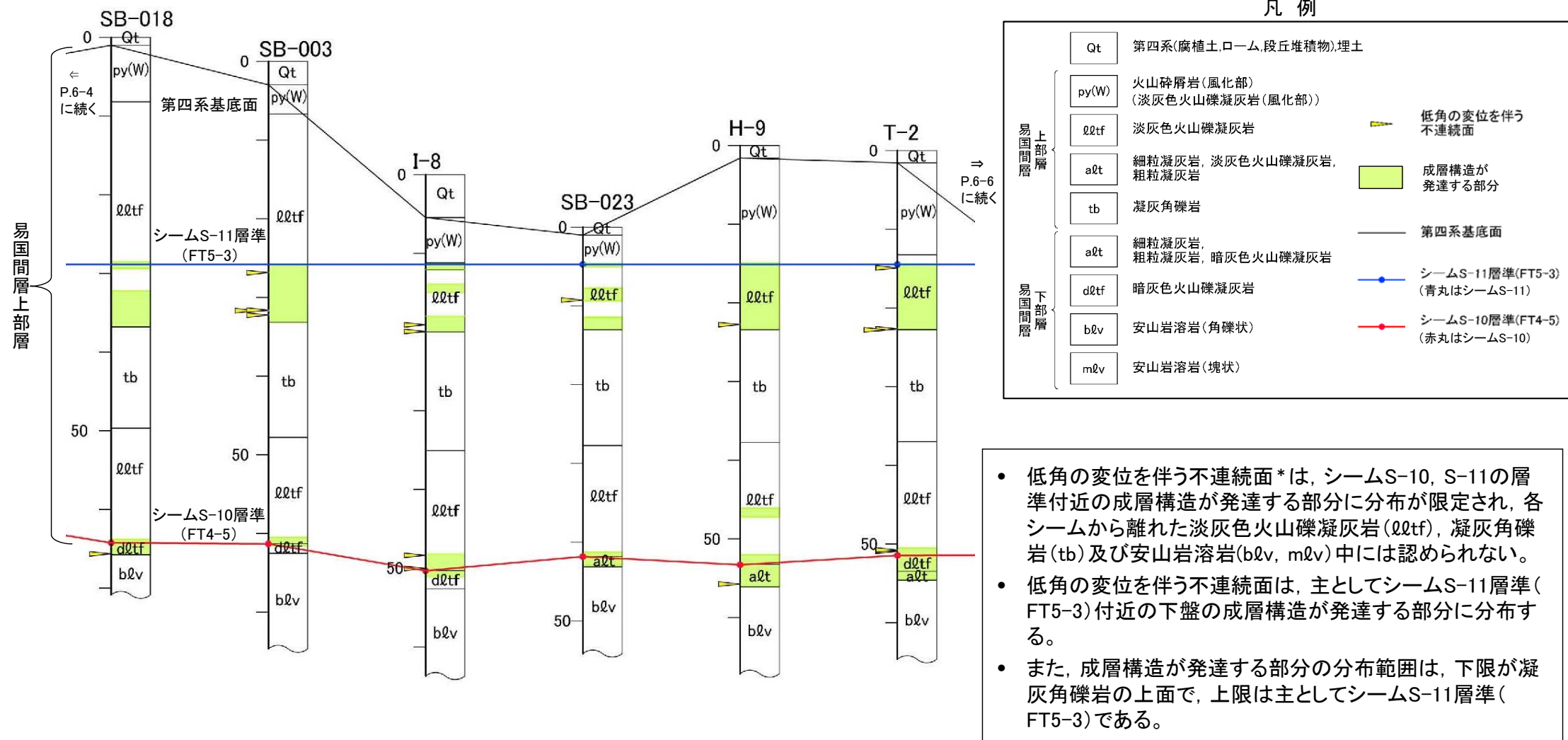
低角の変位を伴う不連続面の分布とシーム及び成層構造が発達する部分との関係

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(5/18)

コメントNo.S2-136



ボーリングコア観察結果(地質柱状図) (3/4)



注) 本図ではシームS-11の層準を基準として地質柱状図を南から北に並べて対比。

低角の変位を伴う不連続面の分布とシーム及び成層構造が発達する部分との関係

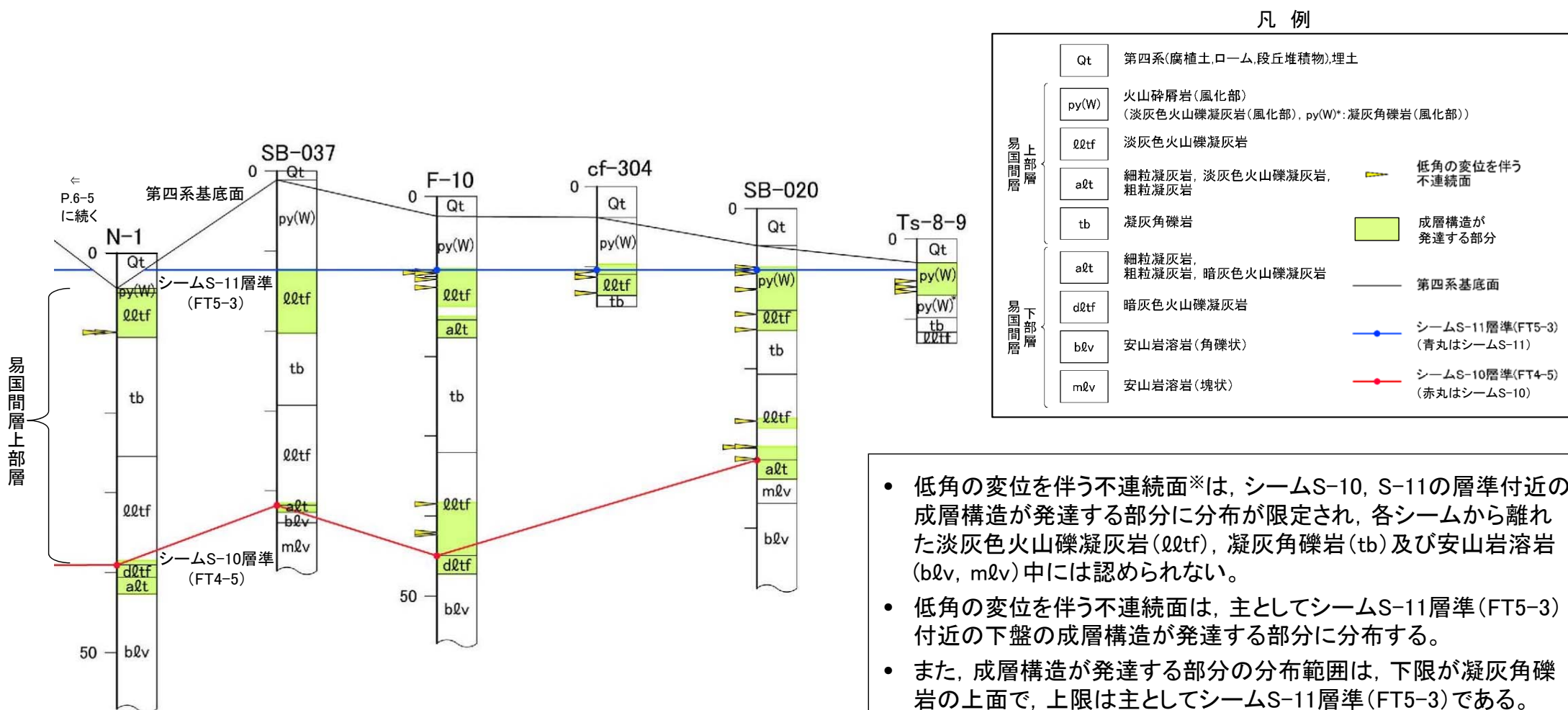
*: ボーリングコアではトレンチ調査と異なり、変位量の判定が困難で、条線も不明瞭なものが多いことから、面が平滑で低角(50°以下)の断裂を保守的に「低角の変位を伴う不連続面」とする。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(6/18)

コメントNo.S2-136



ボーリングコア観察結果(地質柱状図) (4/4)



注) 本図ではシームS-11の層準を基準として地質柱状図を南から北に並べて対比。

低角の変位を伴う不連続面の分布と
シーム及び成層構造が発達する部分との関係

- 低角の変位を伴う不連続面※は、シームS-10, S-11の層準付近の成層構造が発達する部分に分布が限定され、各シームから離れた淡灰色火山礫凝灰岩(lltf)、凝灰角礫岩(tb)及び安山岩溶岩(blv, mlv)中には認められない。
- 低角の変位を伴う不連続面は、主としてシームS-11層準(FT5-3)付近の下盤の成層構造が発達する部分に分布する。
- また、成層構造が発達する部分の分布範囲は、下限が凝灰角礫岩の上面で、上限は主としてシームS-11層準(FT5-3)である。
- なお、SB-020孔及びTs-8-9孔には風化部に分布する低角の変位を伴う不連続面が含まれるが、それらの分布の特徴は新鮮部におけるものと同様で、シームS-11層準(FT5-3層準)付近の成層構造が発達する部分に限定される。

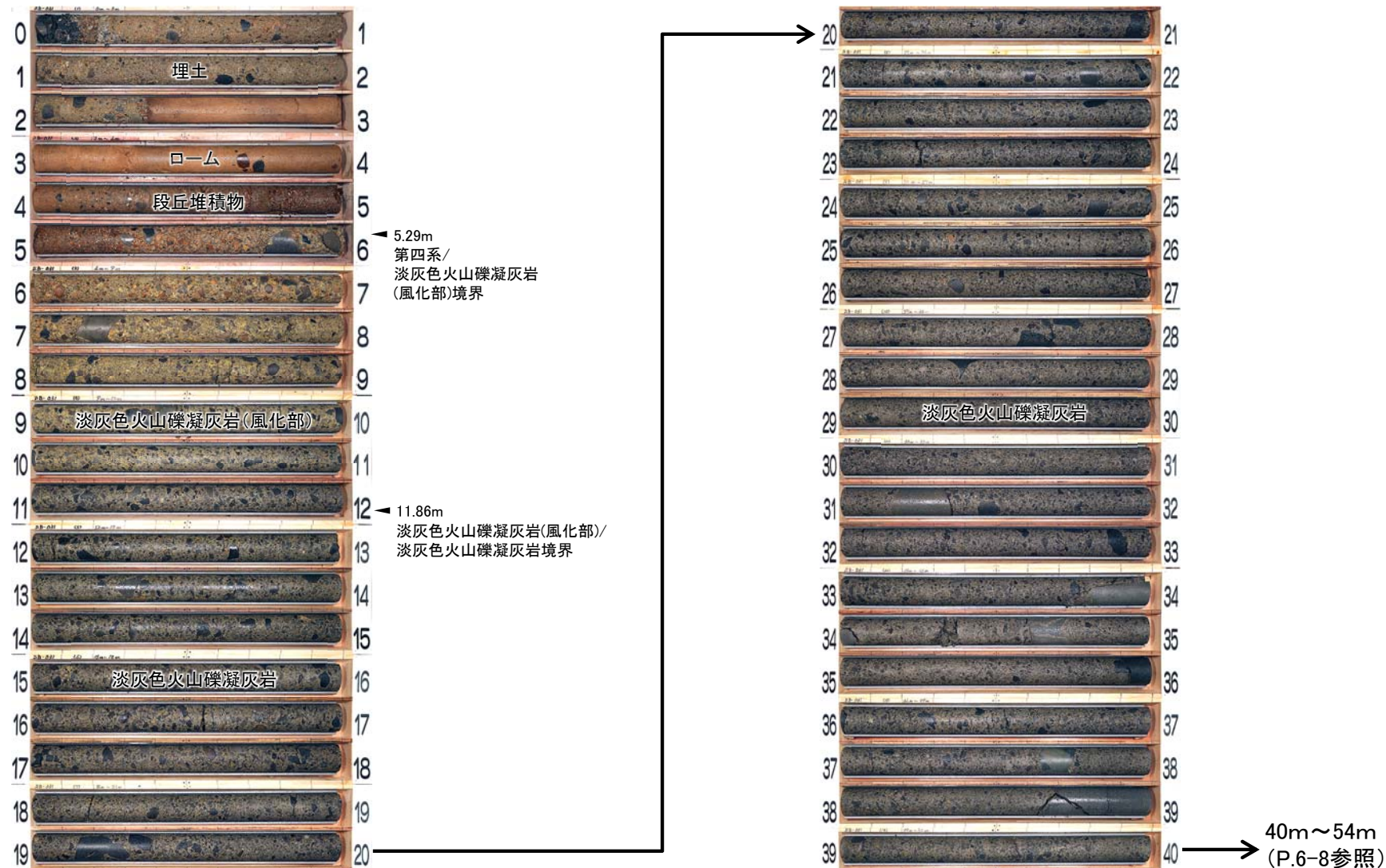
※:ボーリングコアではトレンチ調査と異なり、変位量の判定が困難で、条線も不明瞭なものが多いことから、面が平滑で低角(50°以下)の断裂を保守的に「低角の変位を伴う不連続面」とする。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(7/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-031孔(1/3)(0m~40m区間)

コメントNo.S2-136

SB-031孔(0m~40m区間)



淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められず、低角の変位を伴う不連続面も認められない。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(8/18)

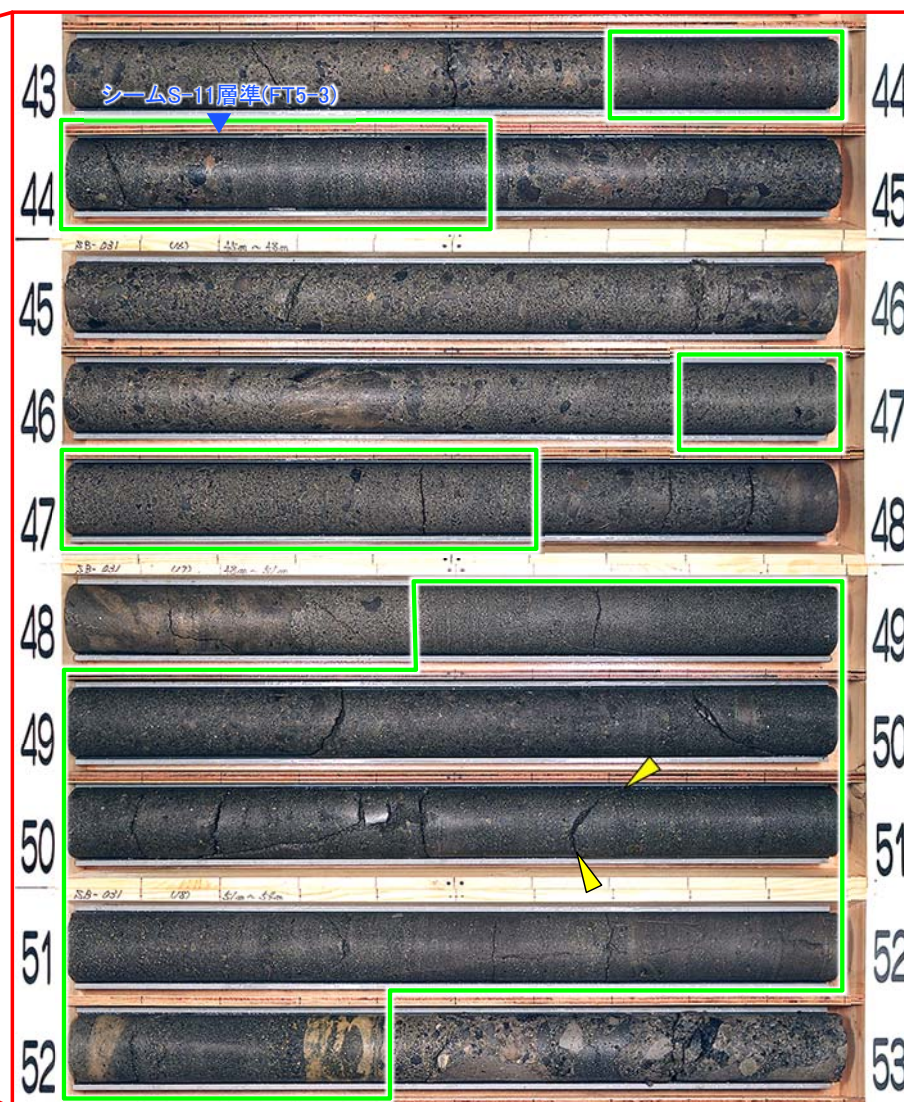
ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-031孔(2/3)(40m~54m区間)

コメントNo.S2-136

SB-031孔(40m~54m区間)



52.41m
淡灰色火山礫凝灰岩
/ 凝灰角礫岩境界
→ 54m~80m
(P.6-9参照)



凡例

- 成層構造が発達する部分
- ▼ 低角の変位を伴う不連続面

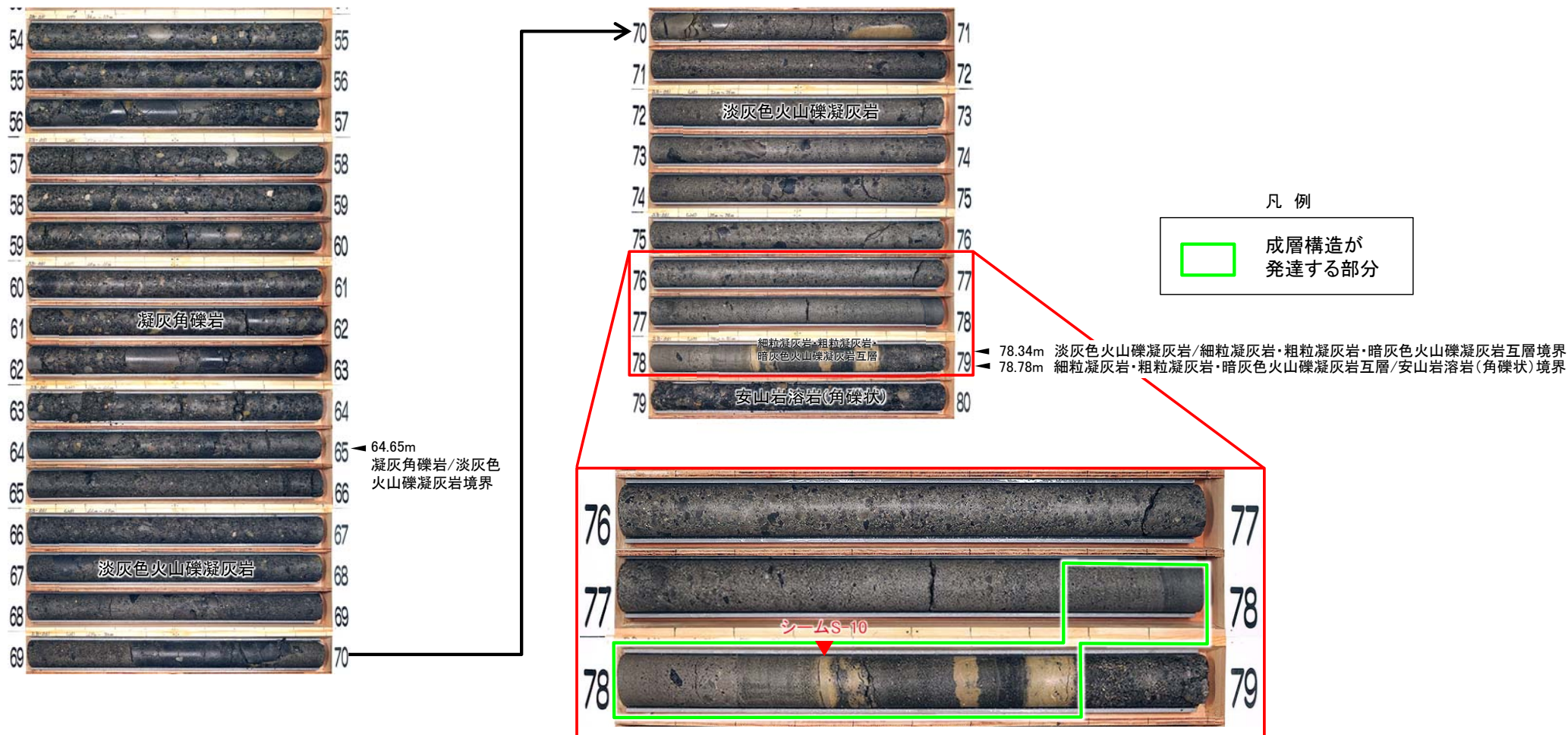
- シームS-11層準付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-11層準付近(約0.9m区間)及びその下位の淡灰色火山礫凝灰岩(約0.8m及び約4.0m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(9/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-031孔(3/3)(54m~80m区間)

コメントNo.S2-136

SB-031孔(54m~80m区間)



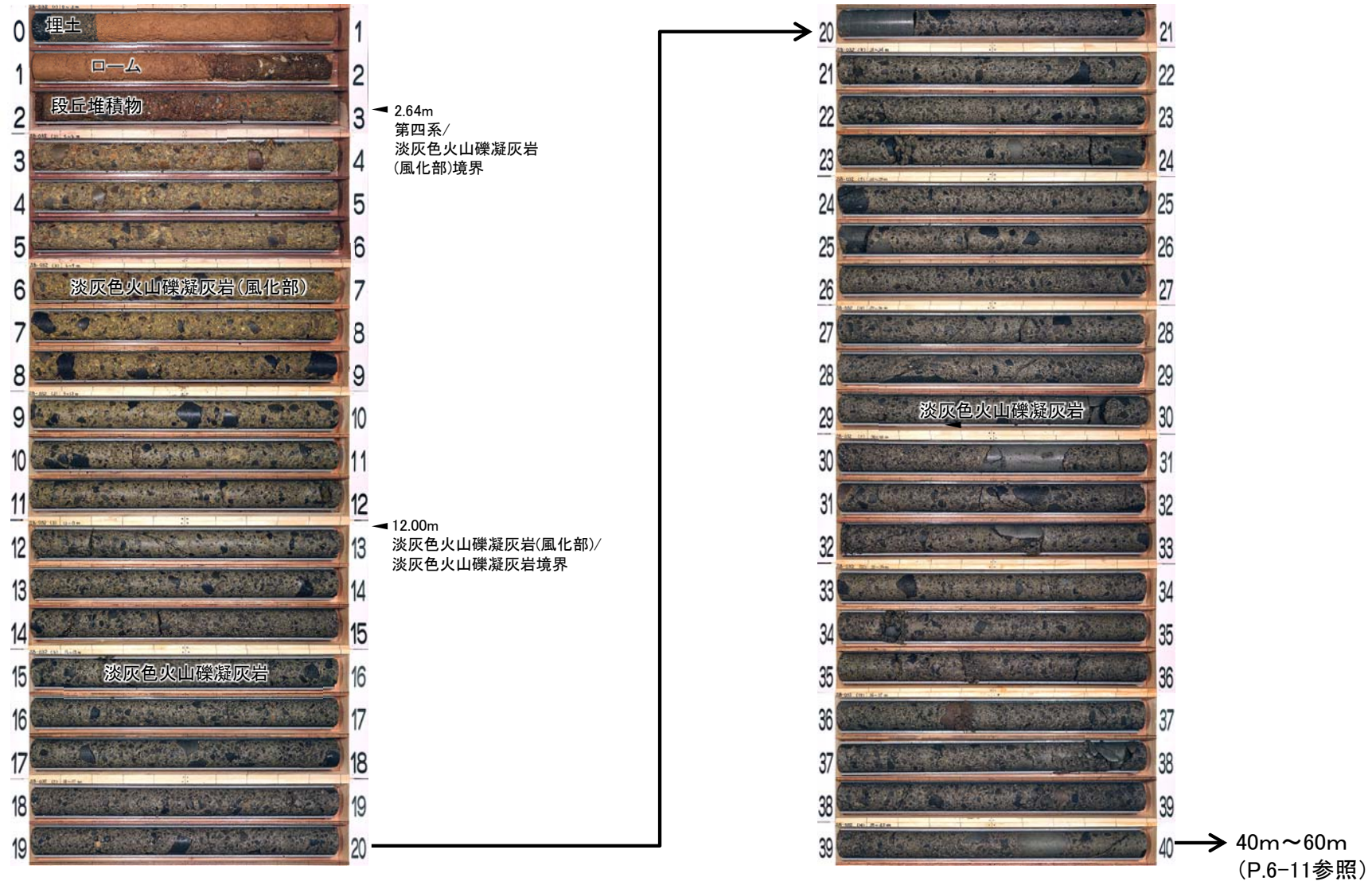
- 凝灰角礫岩及びシームS-10付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-10付近(約1.0m区間)には、成層構造が発達する部分が認められるが、この部分に低角の変位を伴う不連続面は分布しない。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(10/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-032孔(1/3)(0m~40m区間)

コメントNo.S2-136

SB-032孔(0m~40m区間)



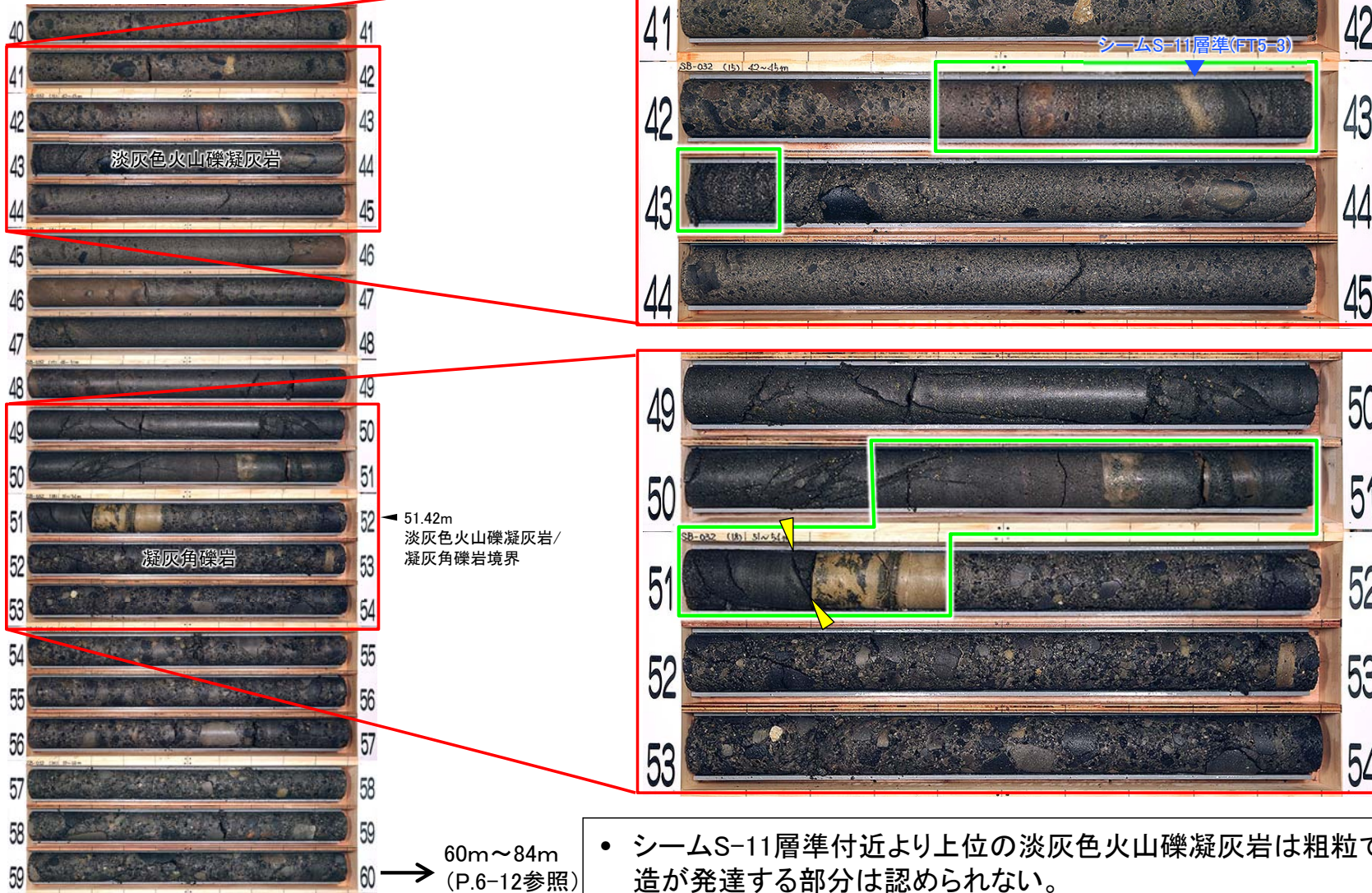
本区間の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められず、低角の変位を伴う不連続面も認められない。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(11/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-032孔(2/3)(40m~60m区間)

コメントNo.S2-136

SB-032孔(40m~60m区間)



凡例

- 成層構造が発達する部分
- ▼ 低角の変位を伴う不連続面

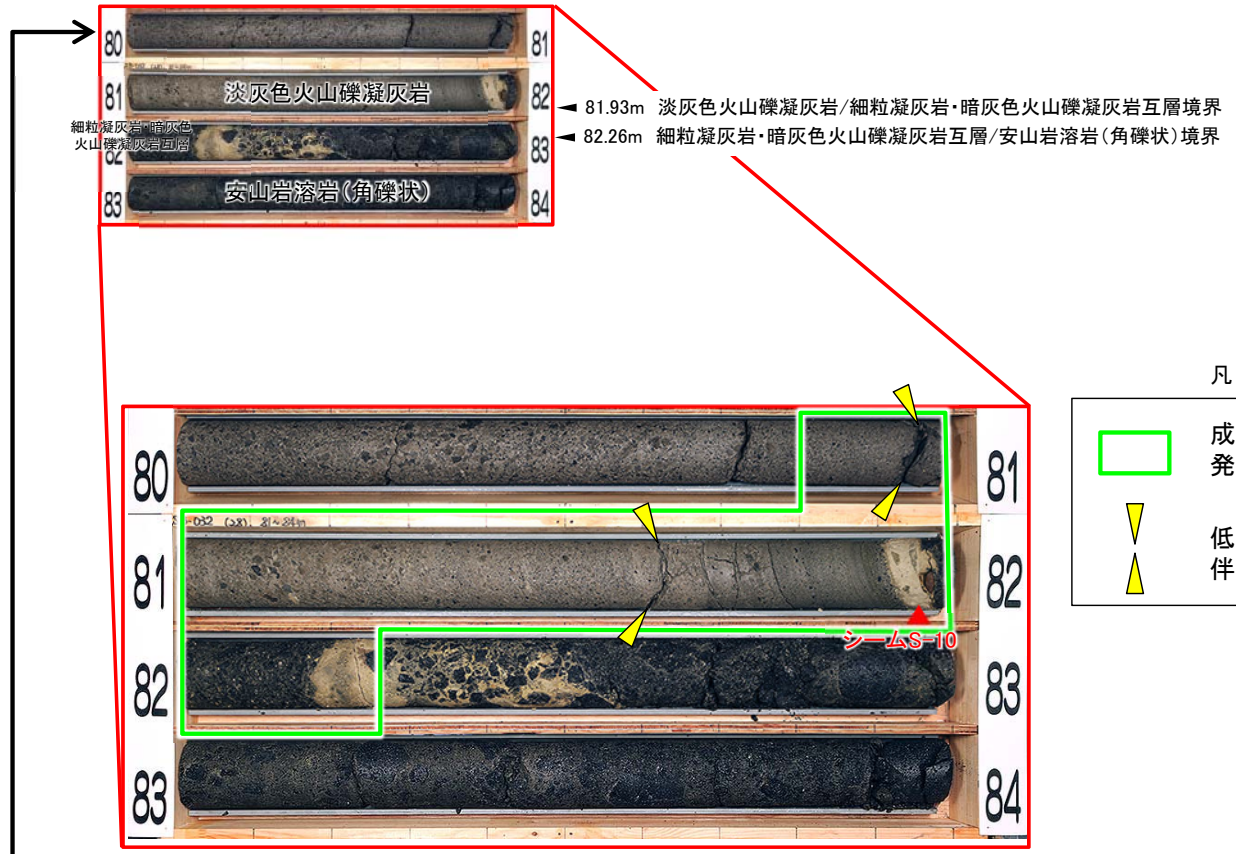
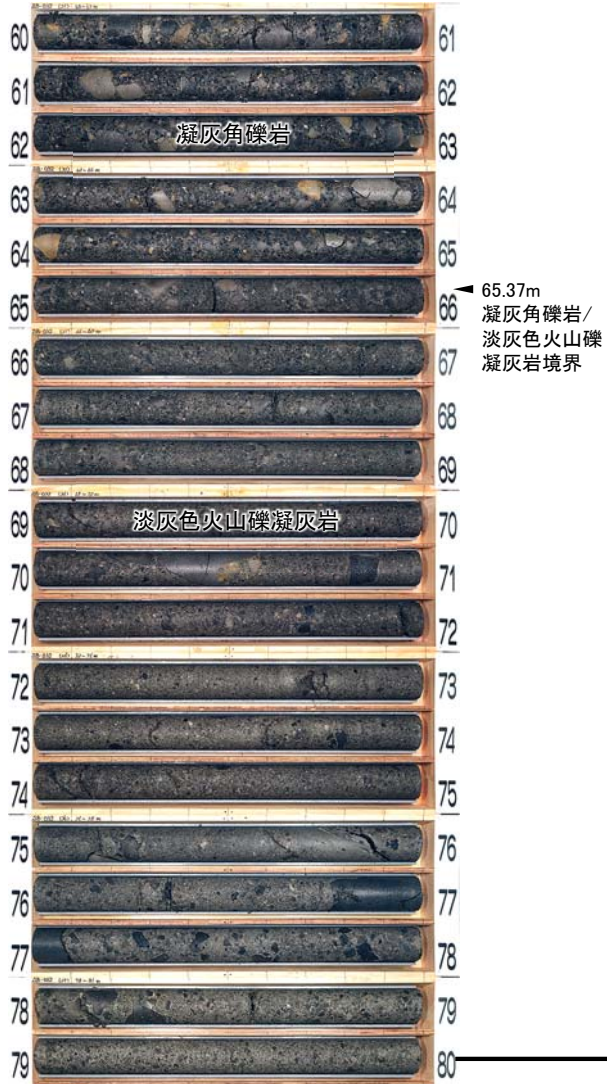
- シームS-11層準付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-11層準付近(約0.8m区間)及びその下位の淡灰色火山礫凝灰岩(約1.1m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(12/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-032(3/3)(60m~84m区間)

コメントNo.S2-136

SB-032孔(60m~84m区間)



凡例

- 成層構造が発達する部分
- ▼ 低角の変位を伴う不連続面

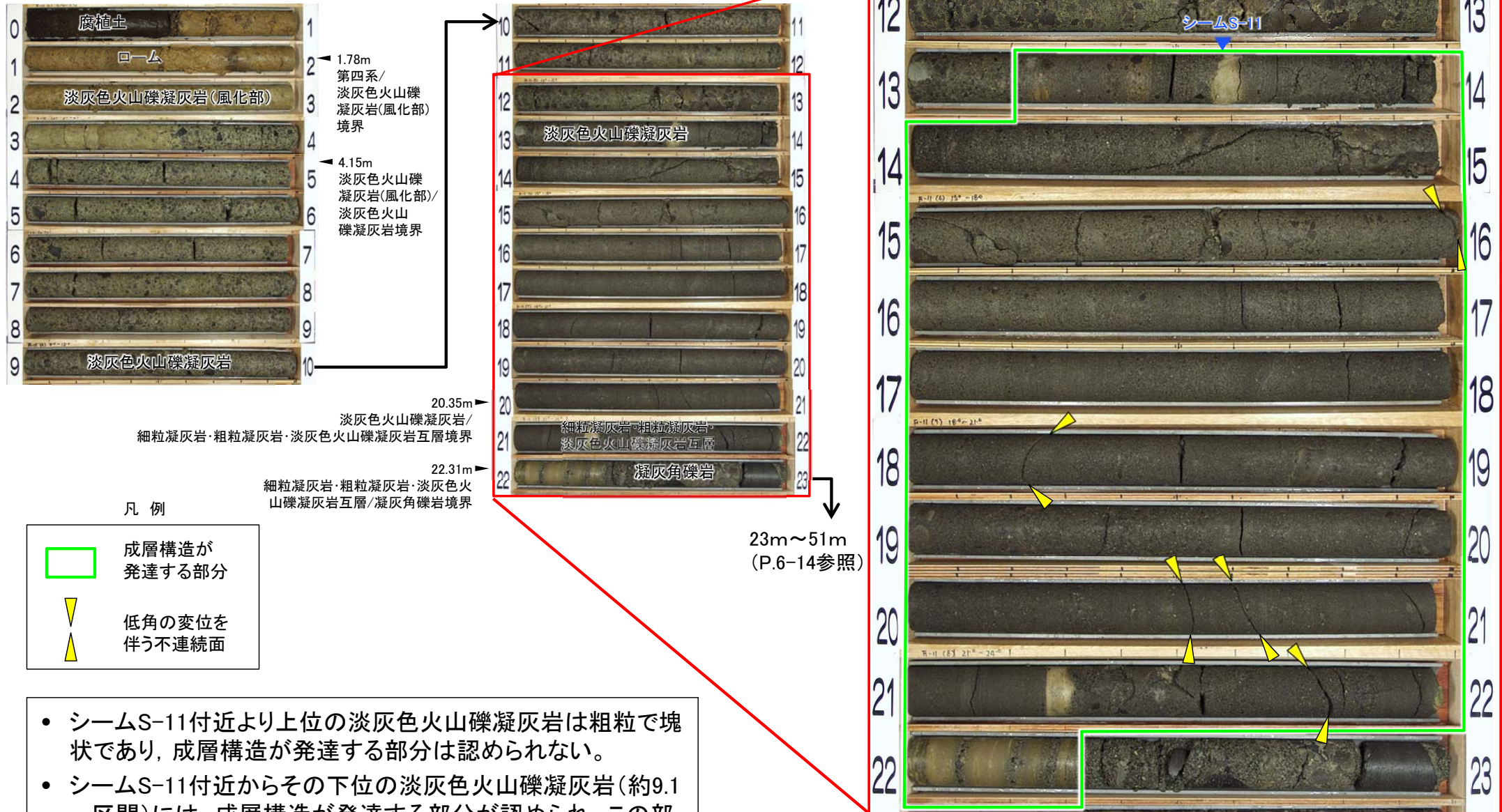
- 凝灰角礫岩及びシームS-10付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-10付近(約1.5m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(13/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): F-11孔(1/2) (0m~23m区間)

コメントNo.S2-136

F-11孔(0m~23m区間)



凡例

成層構造が発達する部分

▼ 低角の変位を伴う不連続面

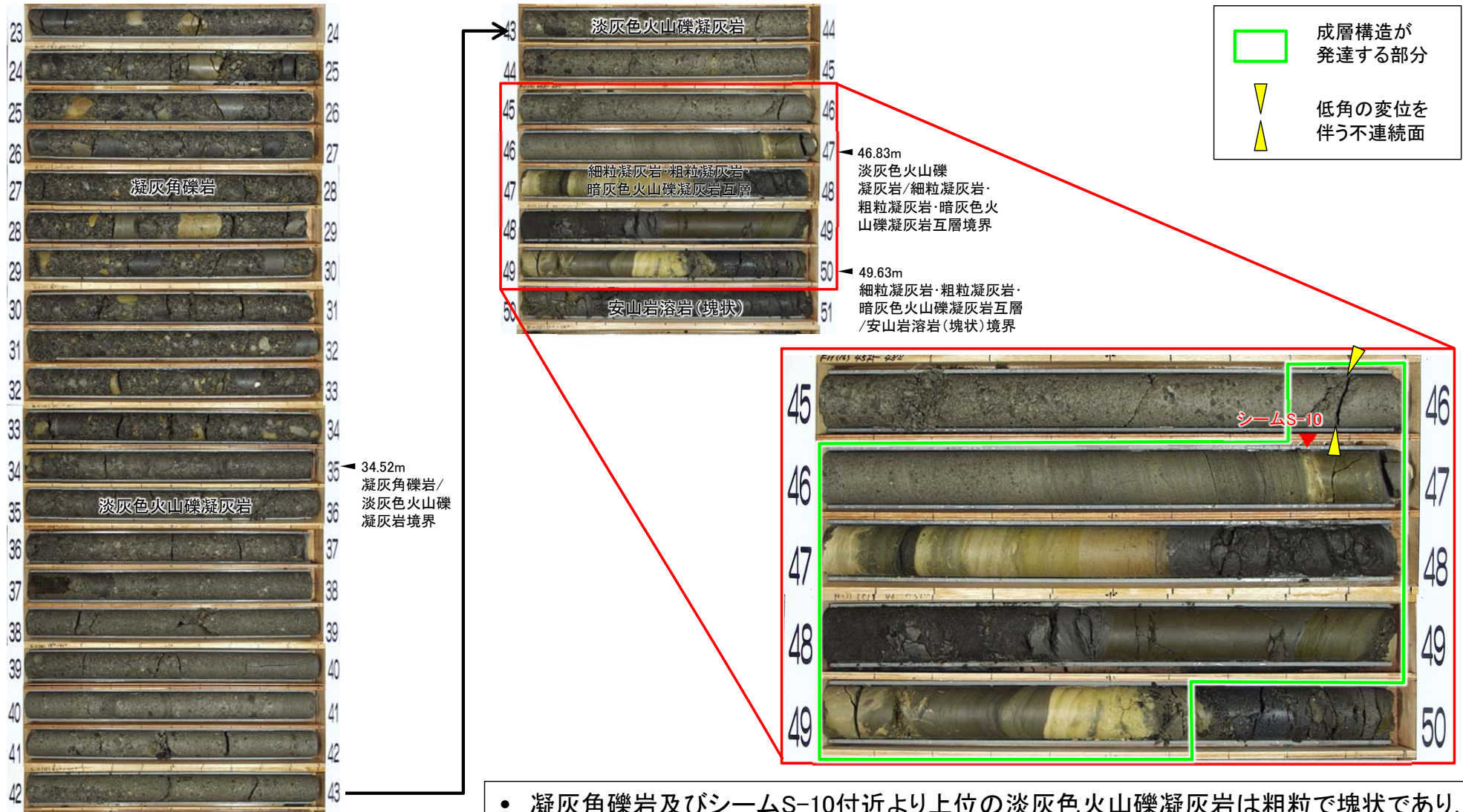
- シームS-11付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-11付近からその下位の淡灰色火山礫凝灰岩(約9.1m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(14/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): F-11孔(2/2) (23m~51m区間)

コメントNo.S2-136

F-11孔(23m~51m区間)



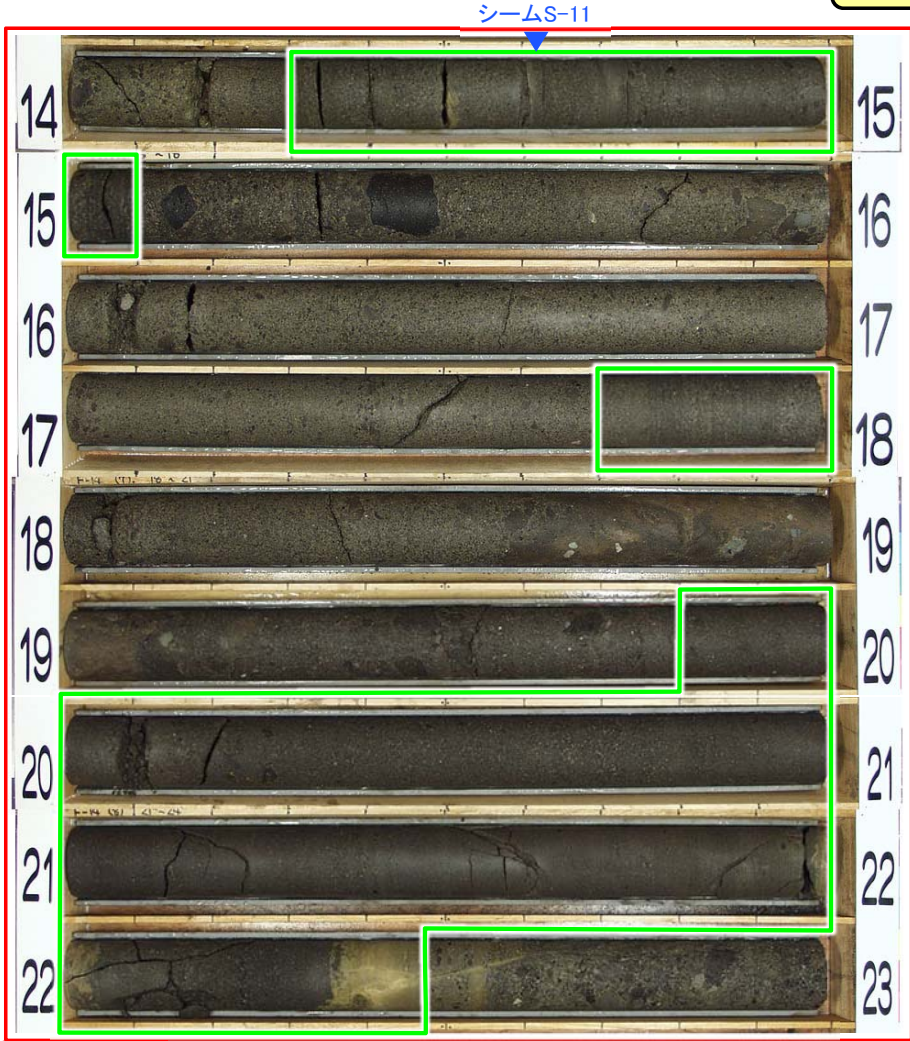
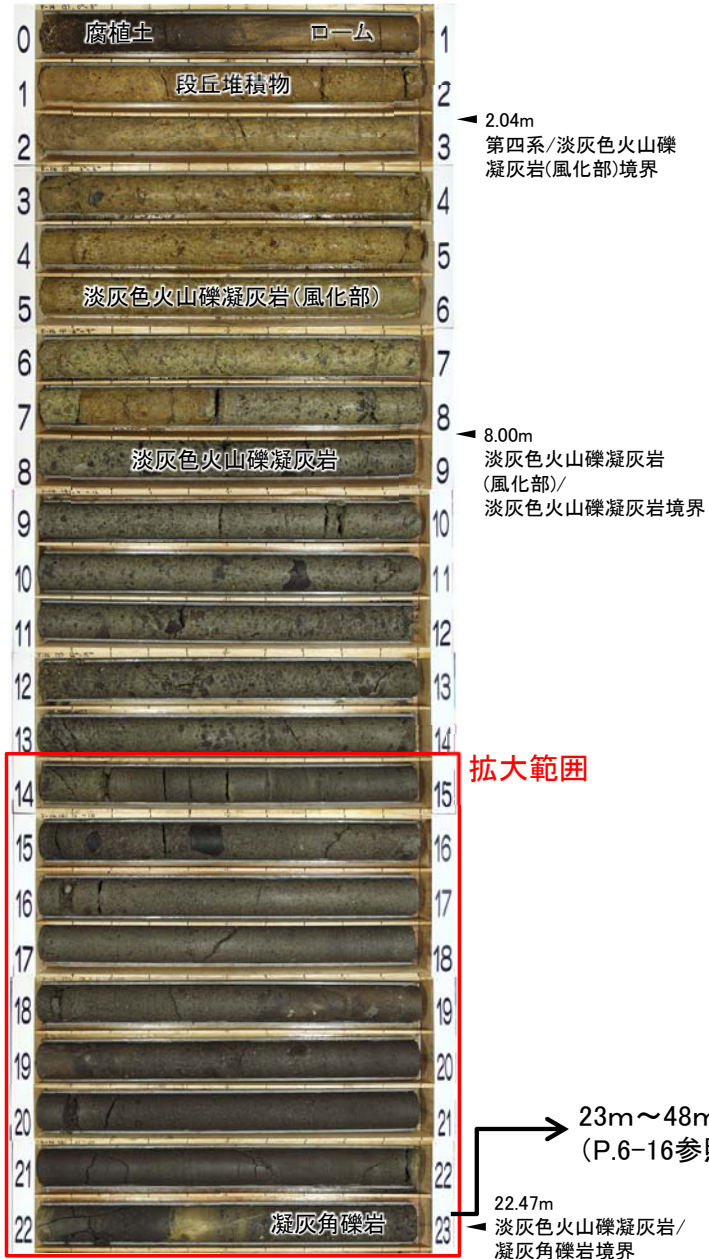
- 凝灰角礫岩及びシームS-10付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-10付近(約3.8m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(15/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): F-14孔(1/2)(0m~23m区間)

コメントNo.S2-136

F-14孔(0m~23m区間)



凡例
 成層構造が発達する部分

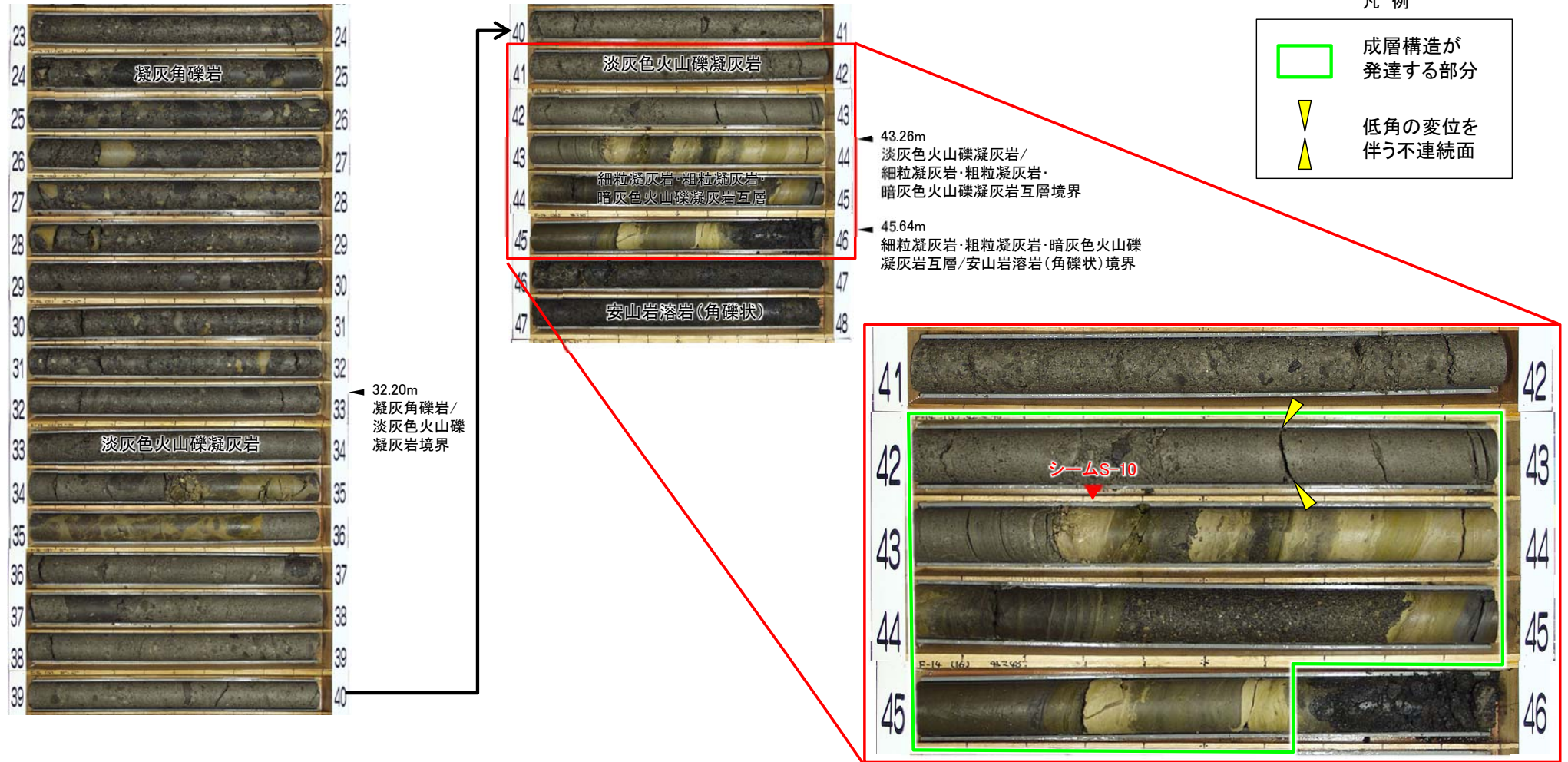
- シームS-11付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-11付近(約0.8m区間)及びその下位の淡灰色火山礫凝灰岩(約0.3m区間及び約2.7m区間)には、成層構造が発達する部分が認められるが、この部分にも低角の変位を伴う不連続面は分布しない。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(16/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): F-14孔(2/2) (23m~48m区間)

コメントNo.S2-136

F-14孔(23m~48m区間)



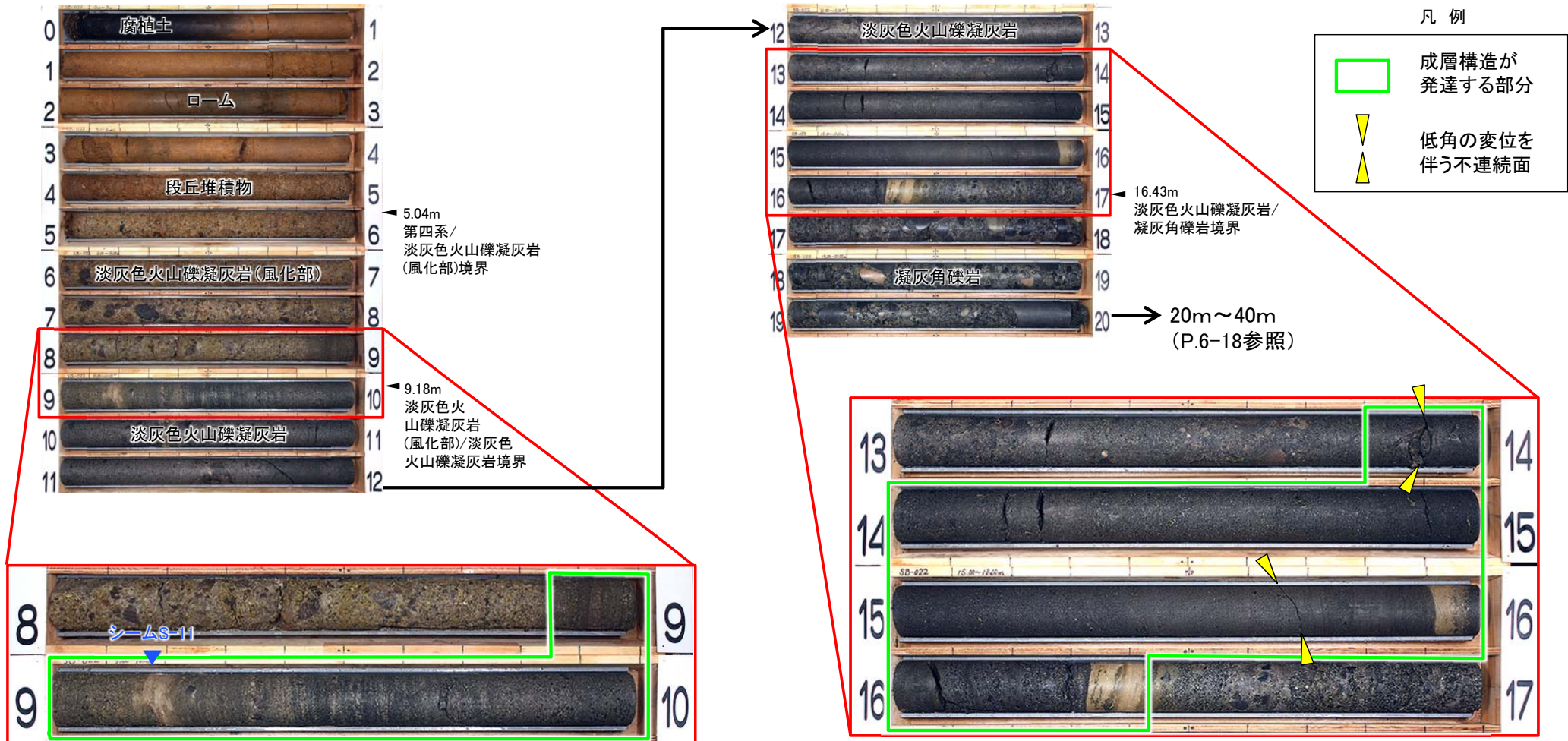
- 凝灰角礫岩及びシームS-10付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-10付近(約3.6m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(17/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-022孔(1/2)(0m~20m区間)

コメントNo.S2-136

SB-022孔(0m~20m区間)



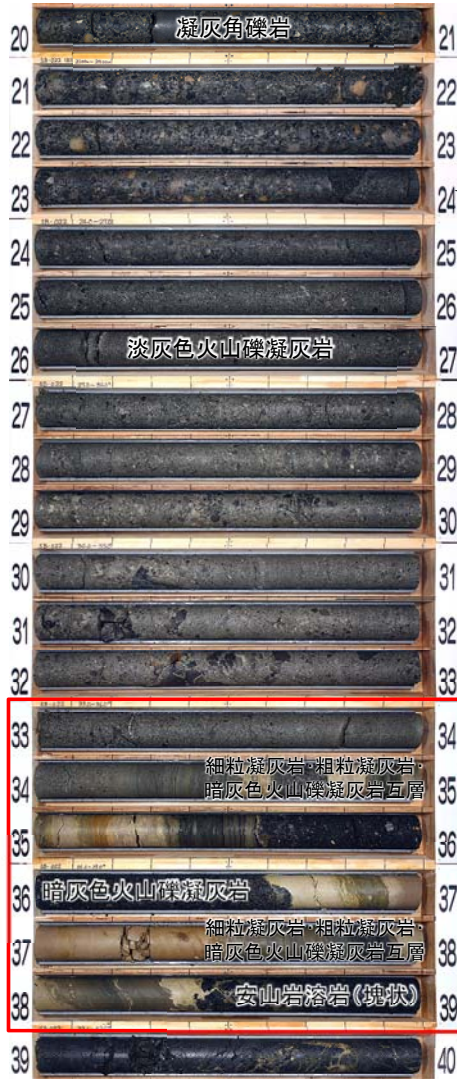
- シームS-11付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-11付近からその下位の淡灰色火山礫凝灰岩(約1.2m区間及び約2.6m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

6. 成層構造及び低角の変位を伴う不連続面の分布(18/18)

ボーリングコア観察結果(コア写真): SB-022孔(2/2)(20m~40m区間)

コメントNo.S2-136

SB-022孔(20m~40m区間)



23.69m
凝灰角礫岩/
淡灰色火山礫凝灰岩
境界

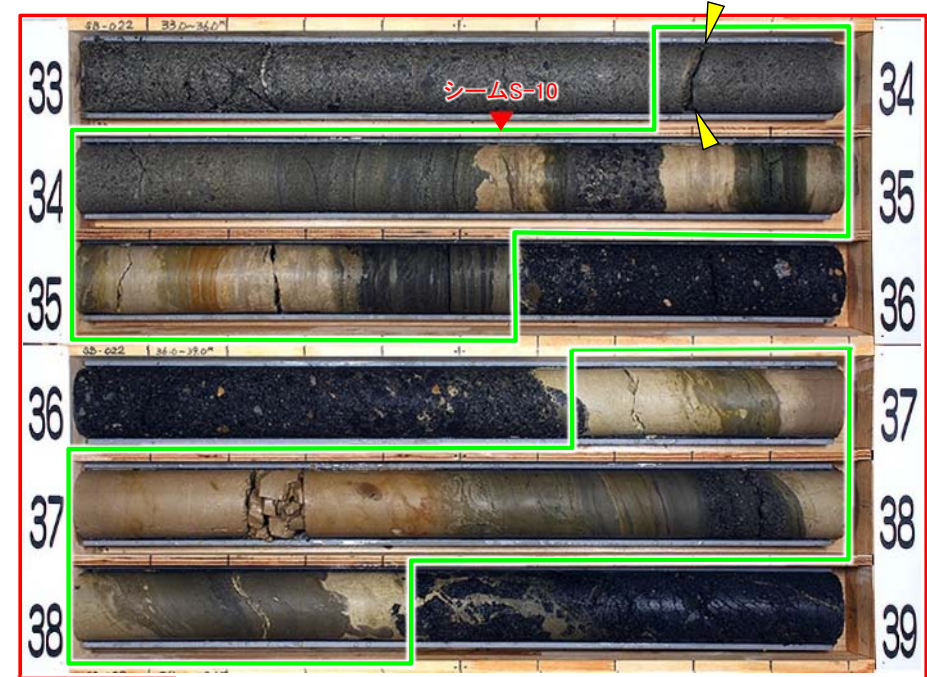
拡大範囲

34.53m
淡灰色火山礫凝灰岩・細粒凝灰岩・
粗粒凝灰岩・暗灰色火山礫凝灰岩互層境界

35.57m
細粒凝灰岩・粗粒凝灰岩・暗灰色火山礫凝灰岩互層/暗灰色火山礫凝灰岩境界

36.64m
暗灰色火山礫凝灰岩/細粒凝灰岩・粗粒凝灰岩・暗灰色火山礫凝灰岩互層境界

38.43m
細粒凝灰岩・粗粒凝灰岩・暗灰色火山礫凝灰岩互層境界/安山岩溶岩(塊状)境界



拡大範囲

凡例

成層構造が発達する部分
▼ 低角の変位を伴う不連続面

- 凝灰角礫岩及びシームS-10付近より上位の淡灰色火山礫凝灰岩は粗粒で塊状であり、成層構造が発達する部分は認められない。
- シームS-10付近(約1.8m区間及び約1.8m区間)には、成層構造が発達する部分が認められ、この部分に低角の変位を伴う不連続面が分布する。

(余白)

7. 変状弱面の形成メカニズムの検討

7.1 新第三紀におけるシームと低角の変位を伴う不連続面の形成(1/6)

コメントNo.S2-136

新第三紀におけるシームと低角の変位を伴う不連続面の形成

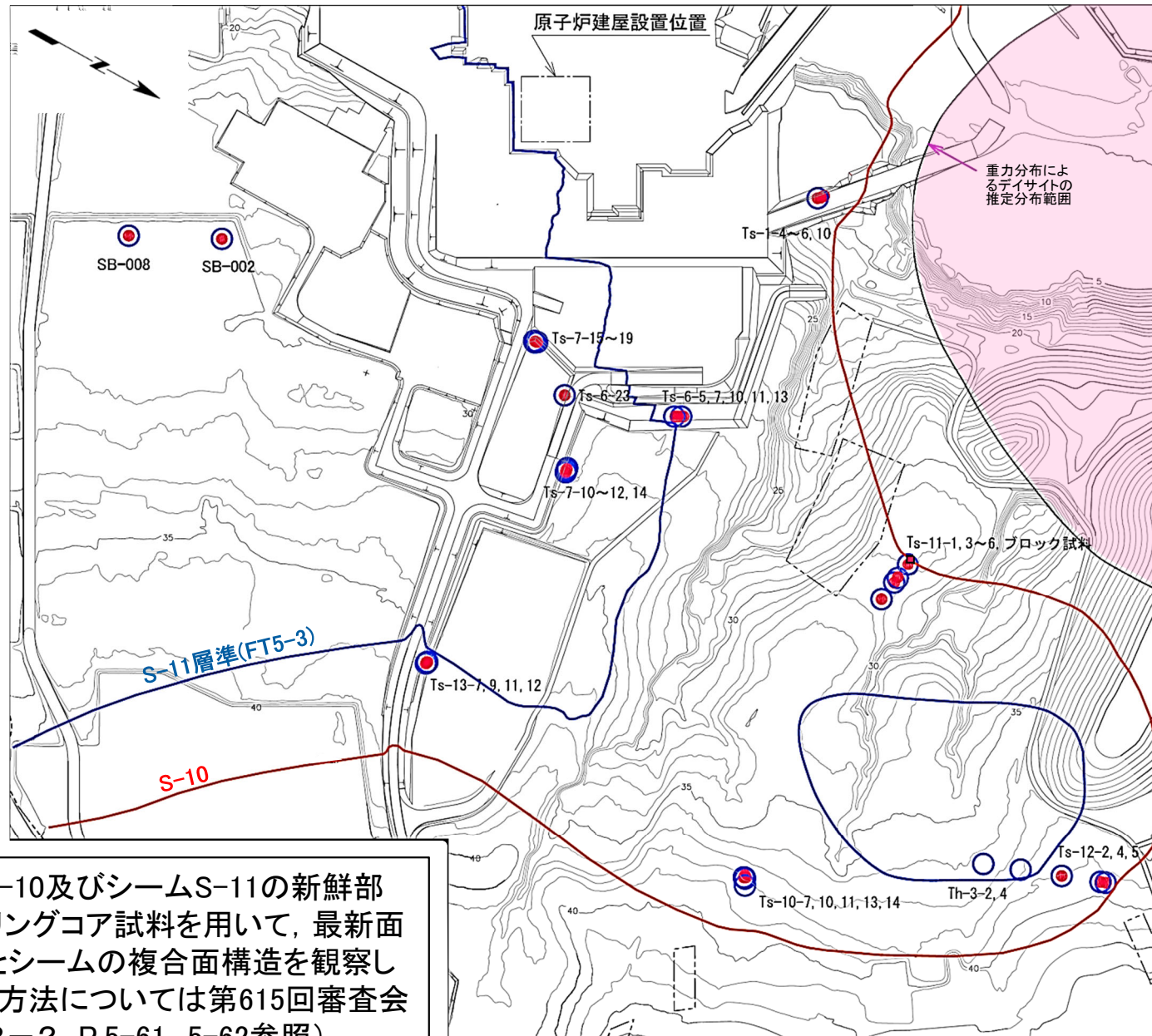
〔本編資料4.2章(1)に関する基礎データ及び補足説明〕

- 新鮮部のシームの条線・複合面構造と応力場との関係のデータを示し、シーム及び低角の変位を伴う不連続面の形成メカニズムについて検討する。



応力場とシームの条線・複合面構造との関係(1/3):シーム試料採取位置図

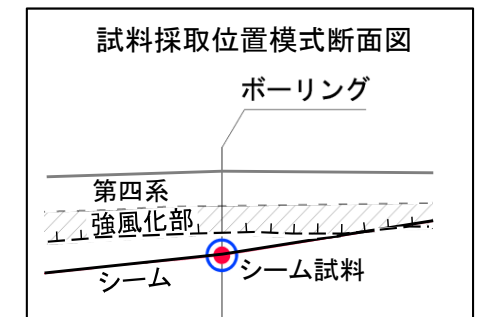
コメントNo.S2-136



凡例

- 敷地境界
- シームS-10が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- シームS-11層準 (FT5-3*) が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- 複合面構造が認められたボーリングコア試料採取位置
- 複合面構造が認められたブロック試料採取位置
- 条線が認められた試料

* : シームS-11を挟む細粒凝灰岩の鍵層名。



注) 本図のシームS-11層準(FT5-3*)の位置は、平成30年5月末時点の掘削面の地質データに基づいて示した。



シームS-10及びシームS-11の新鮮部のボーリングコア試料を用いて、最新面の条線とシームの複合面構造を観察した(観察方法については第615回審査会合資料2-2, P.5-61, 5-62参照)。

7.1 新第三紀におけるシームと低角の変位を伴う不連続面の形成(3/6)

第804回審査会合
資料1-1 P.3-27 一部修正



応力場とシームの条線・複合面構造との関係(2/3):

コメントNo.S2-136

凡 例

【共通】

- 敷地境界
- シームS-10が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- シームS-11層準(FT5-3*)が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- シームの走向・傾斜(平均)

【図1】

- 条線が認められたボーリングコア試料採取位置
- 条線が認められたブロック試料採取位置
- (S-10) (S-11) 最新面の条線方位

【図2】

- 複合面構造が認められたボーリングコア試料採取位置
- 複合面構造が認められたブロック試料採取位置
- (S-10) (S-11) シーム内部構造による上盤の変位方向

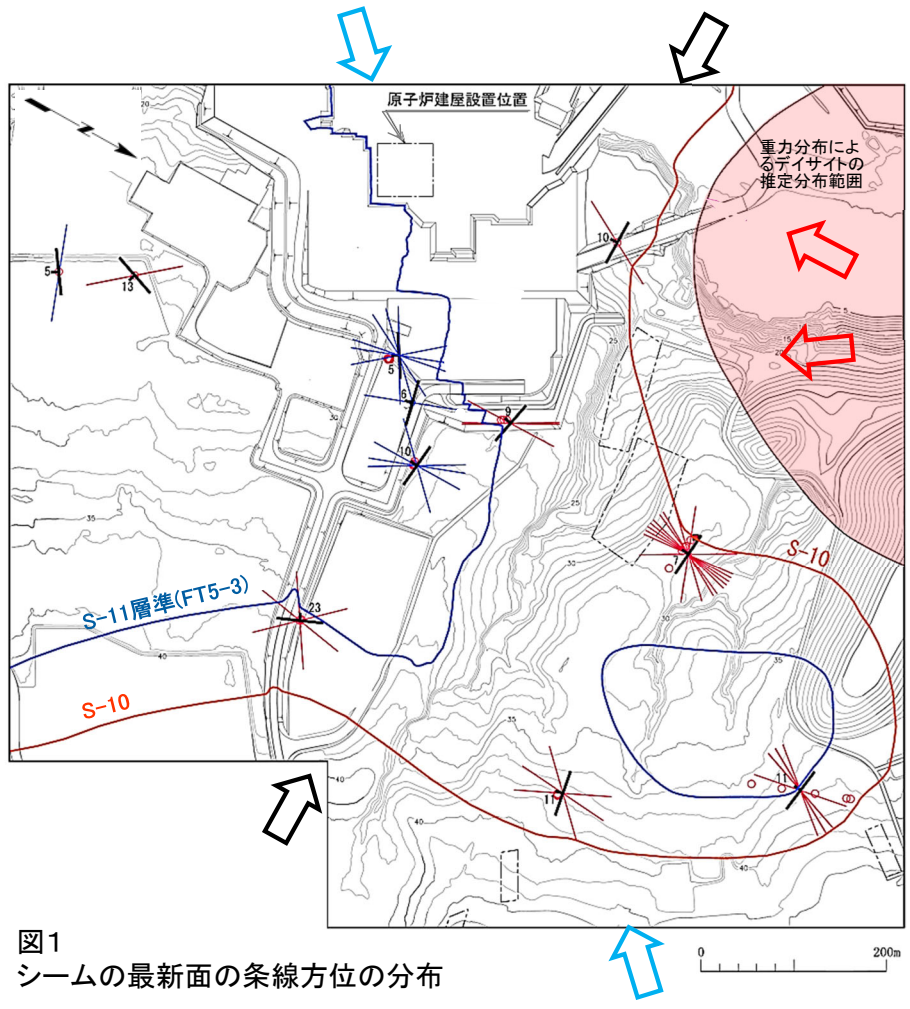


図1 シームの最新面の条線方位の分布

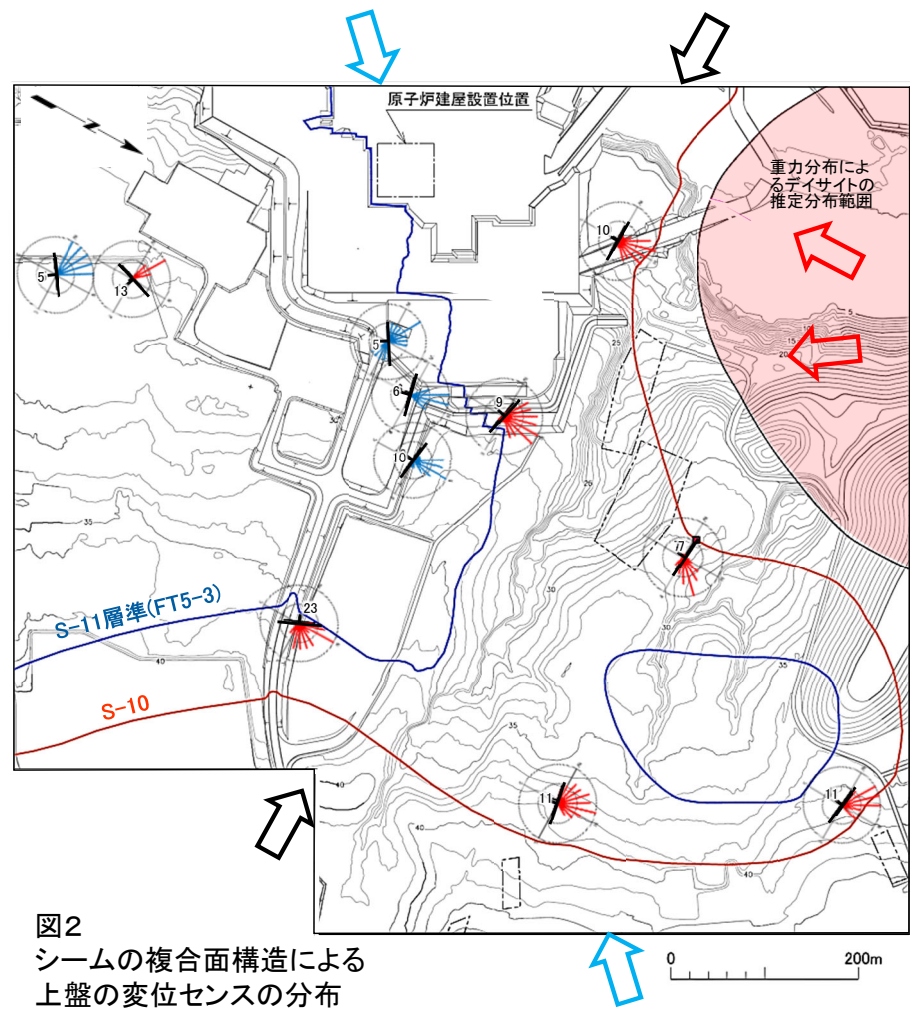


図2 シームの複合面構造による上盤の変位センスの分布

- シームS-10,11の条線(図1)及び複合面構造(図2)は、いずれも中～後期中新世の広域応力場の最大主応力軸方向(NE-SW)及びデイスайト貫入時のローカルな応力場の最大主応力軸方向(N-S~NW-SE)を示すと考えられる。
- 第四紀の応力場を示唆する東西に卓越する方向性は認められない。

- 中～後期中新世の広域応力場の最大主応力軸の方向(NE-SW)*2
- デイスайト貫入時のローカルな応力場の最大主応力軸の方向(N-S~NW-SE)
- 第四紀の応力場の最大主応力軸の方向(E-W)*2

注1) 多重逆解法解析については第615回審査会合資料2-2, P.5-67~P.5-70参照。
注2) 本図のシームS-11層準(FT5-3*)の位置は、平成30年5月末時点の掘削面の地質データに基づいて示した。

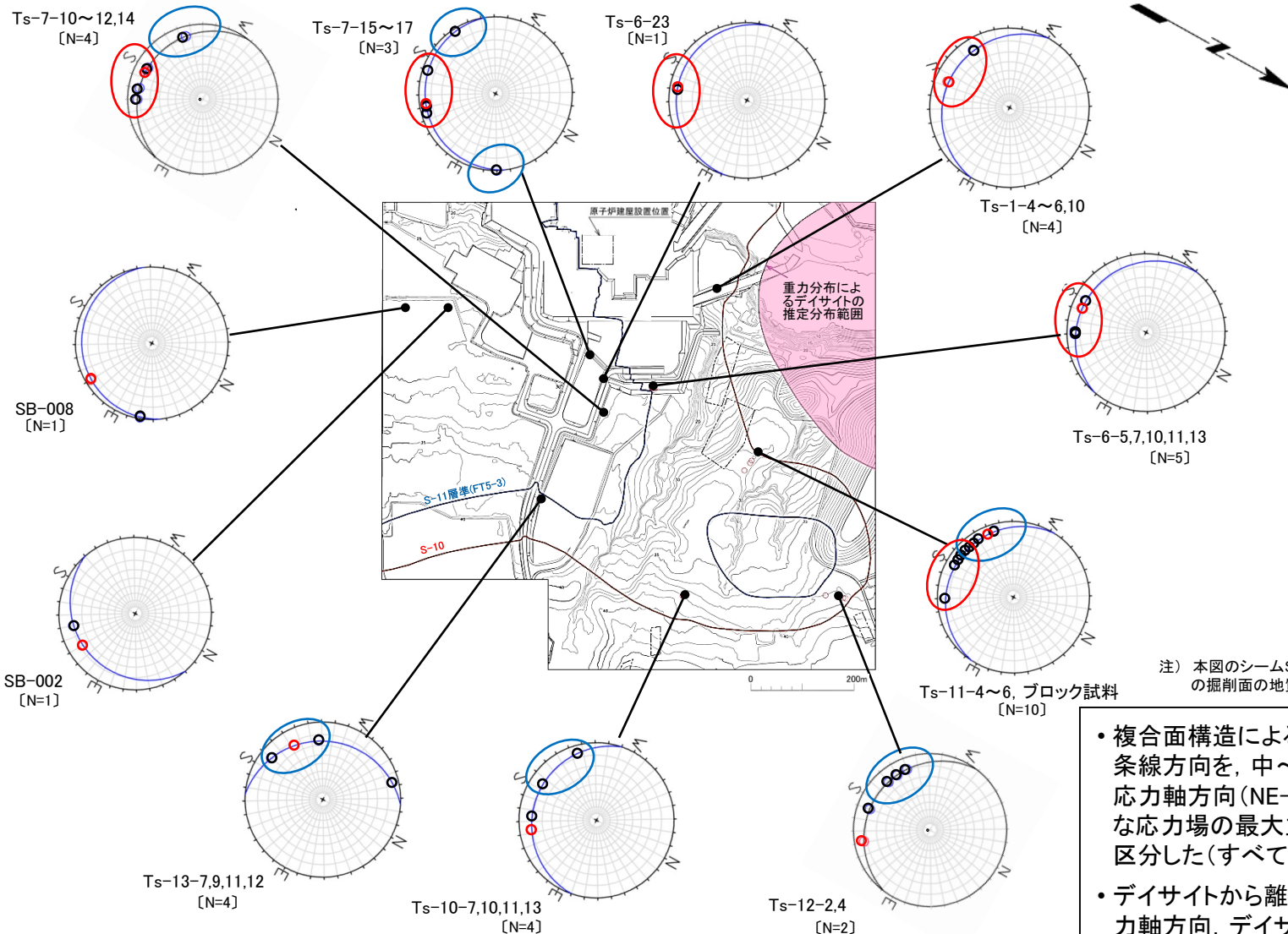
*1: シームS-11を挟在する細粒凝灰岩の層層名。
*2: 下北半島における応力場の変遷は本編資料P.4-68参照。



応力場とシームの条線・複合面構造との関係(3/3)

コメントNo.S2-136

凡例



凡例

- 敷地境界
- シームS-10が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- シームS-11層準(FT5-3*)が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- 試料採取位置

ウルフネット(下半球投影) 凡例

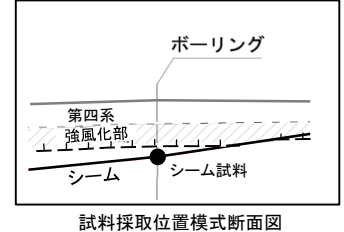
- 複合面構造による上盤の変位方向
- シーム最新面の条線方向

[N=1] データ数
大円はシームの走向・傾斜

[上盤の変位方向・条線方向のタイプ]

- 中～後期中新世の広域応力場の最大主応力軸の方向 (NE-SW) *2
- デイサイト貫入時のローカルな応力場の最大主応力軸の方向 (N-S~NW-SE)

*1: シームS-11を挟む細粒凝灰岩の鍵層名。
*2: 北北半島における応力場の変遷は本編資料P.4-68参照。



注) 本図のシームS-11層準(FT5-3*)の位置は、平成30年5月末時点の掘削面の地質データに基づいて示した。

- 複合面構造による上盤の変位方向及びシーム最新面の条線方向を、中～後期中新世の広域応力場の最大主応力軸方向(NE-SW)及びデイサイト貫入時のローカルな応力場の最大主応力軸方向(N-S~NW-SE)の2つに区分した(すべてシーム沿いに上方に変位するセンス)。
- デイサイトから離れた場所では広域応力場の最大主応力軸方向、デイサイト近傍ではローカルな応力場の最大主応力軸方向の変位を示す傾向が認められる。

7.1 新第三紀におけるシームと低角の変位を伴う不連続面の形成 (5/6)




コメントNo.S2-136



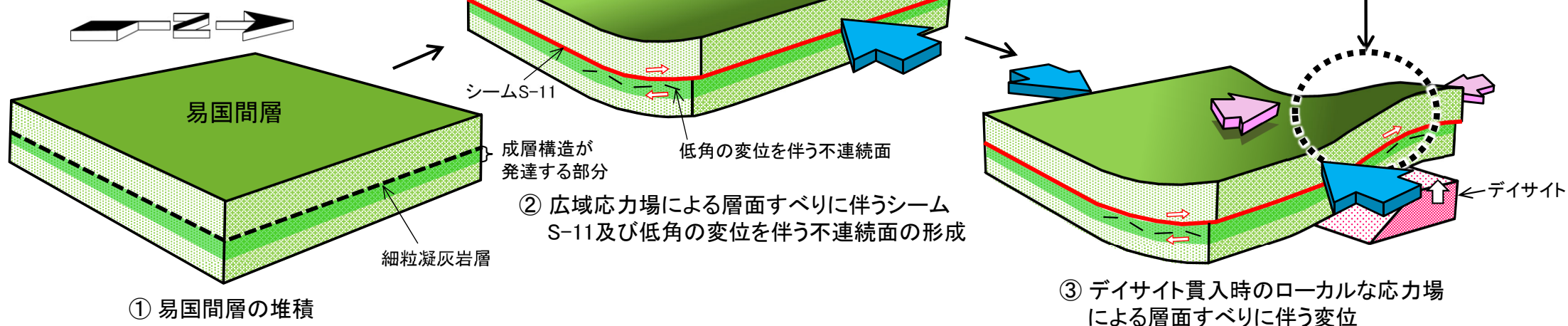
シーム及び低角の変位を伴う不連続面の形成

第804回審査会合
資料1-1 P.3-29 一部修正

凡例

-  中～後期中新世の広域応力場の最大主応力軸の方向 (NE-SW) *
-  デイサイト貫入時のローカルな応力場の最大主応力軸の方向 (N-S～NW-SE)
-  変位センス

* : 下北半島における応力場の変遷は本編資料P.4-68参照。



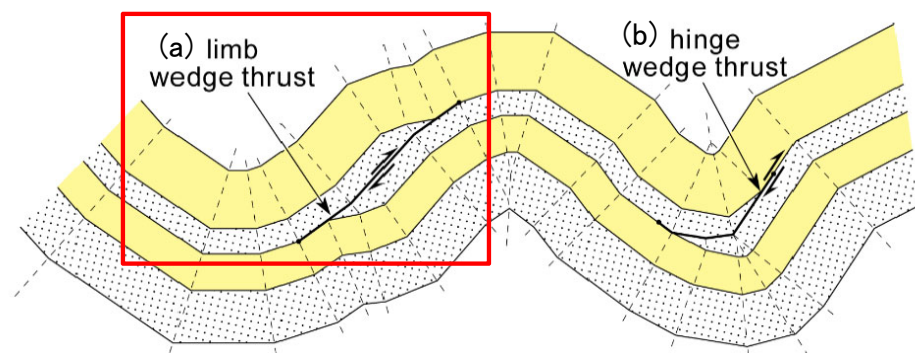
- ・シームS-11の層準の細粒凝灰岩の主として下盤には、成層構造が発達する部分が堆積した〔①〕(本編資料P.4-40～P.4-44参照)。
- ・シームS-11は、広域応力場及びデイサイトの貫入により、細粒凝灰岩層内に層面すべりに伴う割れ目が形成され、その割れ目に沿う低温の熱水変質作用によって形成された低角の古い構造と考えられる〔②, ③〕。
- ・シームの形成時期は、シームの条線・複合面構造と広域応力場及びデイサイトの貫入との関係から、新第三紀中～後期中新世と判断される(P.7-2～P.7-4参照)。
- ・文献に基づく検討によれば、低角の変位を伴う不連続面は、層面すべりに伴う割れ目の形成時にシーム付近の成層構造が発達する部分に形成されたものと考えられ(P.7-6参照)、成層構造が発達する部分に分布が限られる地質観察の結果と整合的である〔②, ③〕。
- ・したがって、新第三紀のシームの形成に伴い、その付近に低角の変位を伴う不連続面が同じ形成メカニズムで形成されたと考えられる。

7.1 新第三紀におけるシームと低角の変位を伴う不連続面の形成(6/6)

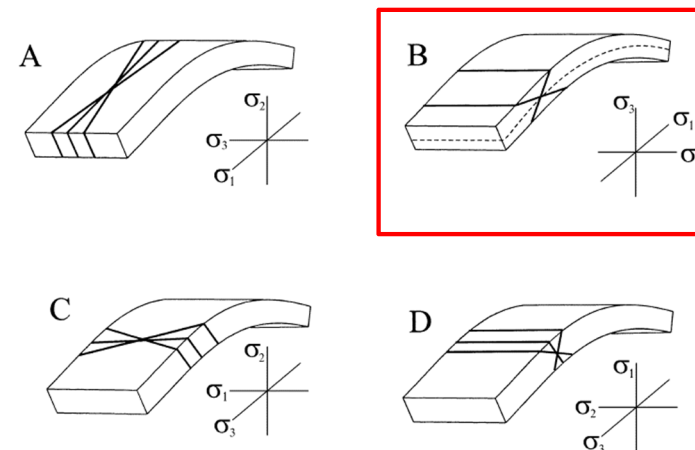
コメントNo.S2-136



低角の変位を伴う不連続面の形成メカニズム

第804回審査会合
資料1-1 P.4-116 一部修正

このような低角逆断層は、変位量が比較的小さく急激に減少し、上盤が背斜軸に向かって上がる形態を示す。

Burg (2017)³⁾に加筆

A(横ずれ), B(逆断層)は σ_1 が層理面に平行で褶曲軸に直交, C(横ずれ)は σ_1 が層理面・褶曲軸に平行, D(正断層)は σ_1 が層理面・褶曲軸に直交。

Bui (2004)⁴⁾

図1 フレキシユラルスリップ褶曲の翼部や軸部に形成される低角逆断層

図2 褶曲に関連して形成される主要な割れ目系の概念図

文献の記載(図1及び図2)	大間地点の変位を伴う不連続面の分布
<ul style="list-style-type: none"> 成層した地層のフレキシユラルスリップ褶曲の翼部には、様々な割れ目、断層等が形成される。低角度の傾斜の小規模な割れ目等として、文献には図1(a)及び図2Bなどが示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 主としてシームS-11下盤の淡灰色火山礫凝灰岩等には成層構造が発達している(本編資料P.4-41~P.4-44)。 中新世の広域応力場による褶曲及びデイサイト貫入時の褶曲の際に、褶曲の翼部に位置していた大間地点の敷地の成層構造の発達した部分には、シームの形成に伴って(P.7-5参照)、左記の文献に示されたような低角の変位を伴う不連続面が形成されたものと考えられる。

第四紀における変状弱面の形成時期の検討

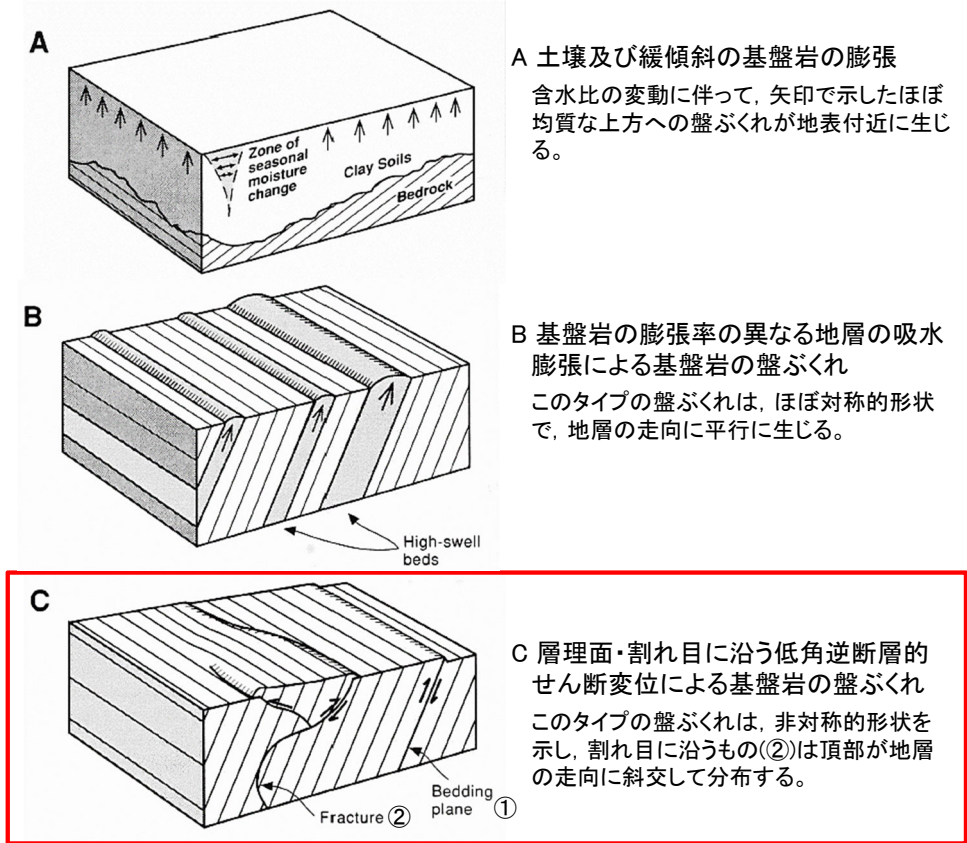
〔本編資料4.2章(2)に関する補足説明〕

- 既存の地質弱面を利用した変状弱面の形成メカニズム及び変状弱面の形成時期に関わる海岸の岩盤の風化状況、岩石の風化速度について検討する。

7.2 第四紀における変状弱面の形成時期の検討(2/5)

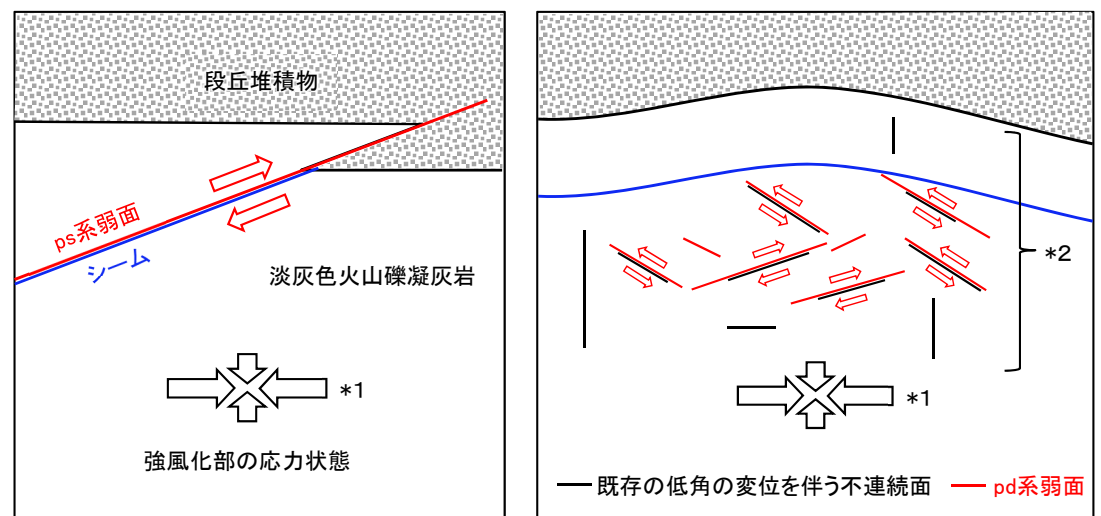
既存の地質弱面を利用した変状弱面の形成メカニズム

コメントNo.S2-136, 137



Noe and Dodson (1999)⁶⁾に加筆

図1 土壌の膨張と岩盤の盤ぶくれの概念図



(a) ps系弱面の形成

(b) pd系弱面の形成

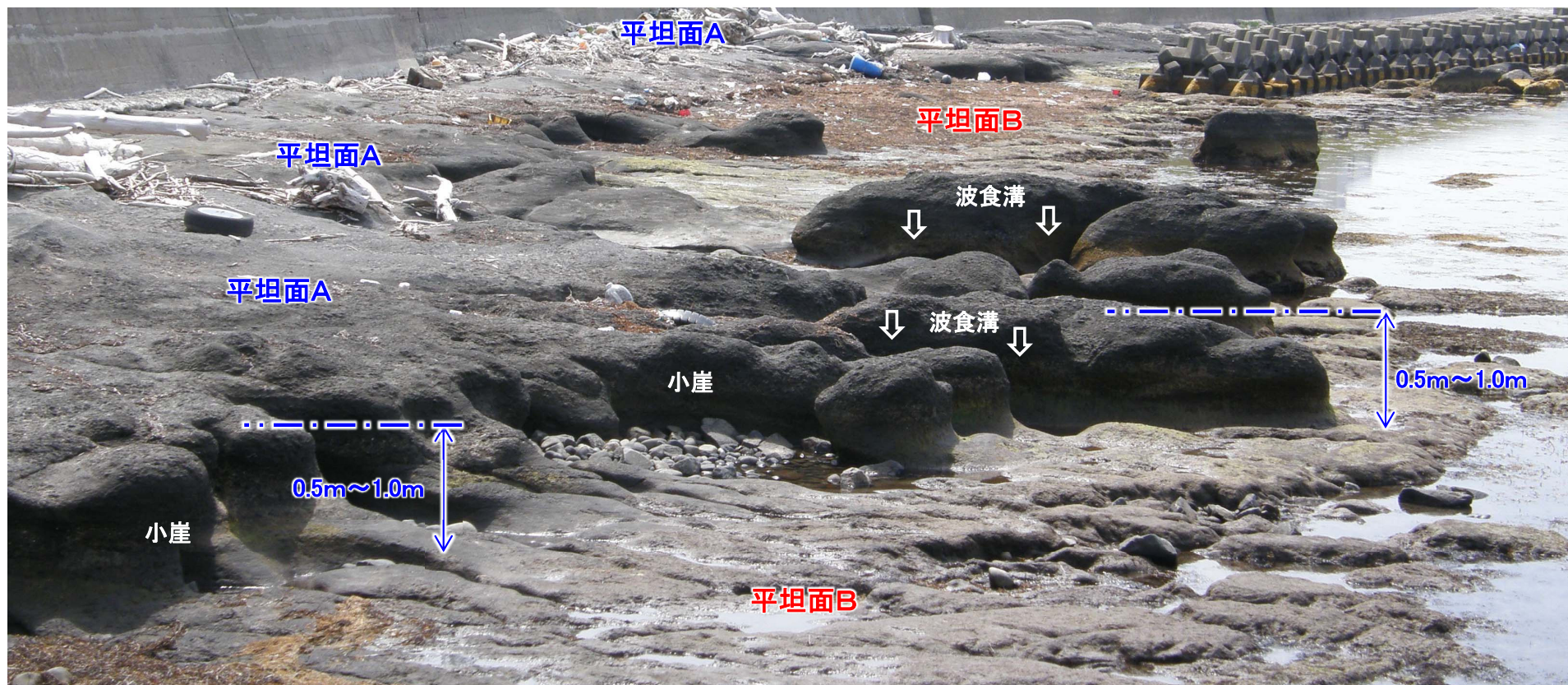
- *1: 地表付近では上載層による拘束が小さく、変状形成時の最大圧縮主応力軸は水平に近かったものと推定される。これはTs-6及びTs-8トレンチのpd系弱面形成時の応力解析結果(P.7-15, 本編資料P.4-75参照)と整合的。
- *2: 低角の変位を伴う不連続面は、主としてシームS-11下盤の成層構造が発達する部分に多く分布する(P.6-1~P.6-18, 本編資料P.4-40~P.4-44参照)。

図2 シームや既存の低角の変位を伴う不連続面を利用した変状弱面の形成の概念図

文献の記載(図1)	大間地点の変位を伴う不連続面に沿う変位の発生(図2)
<ul style="list-style-type: none"> • 既存の割れ目、断層等が分布していると、新たに形成されるノンテクトニック断層はそれらを弱面として利用することが多いとされている(永田(2018)⁵⁾)。 • Noe and Dodson (1999)⁶⁾は、調査結果に基づいて土壌・岩盤の膨張・盤ぶくれの3タイプの概念図を示した(図1)。図1Cには低角の割れ目に沿う変位の発生が示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> • ps系弱面は図1Cの層理面に沿うタイプ(①)、pd系弱面は同じ図の割れ目に沿うタイプ(②)と類似のものと考えられる。 • 変状弱面は、強風化部の形成に伴う膨張や地震動等による水平方向の最大主応力により、風化により強度の低下した既存のシームや低角の変位を伴う不連続面を利用して変位を生じたもので、シーム及びその付近の成層構造の発達した部分に局所的に形成されたものと考えられる。

7.2 第四紀における変状弱面の形成時期の検討(3/5)

強風化部の形成時期に関する検討(1/2):現在の海岸における岩盤の風化状況



大潮干潮時撮影

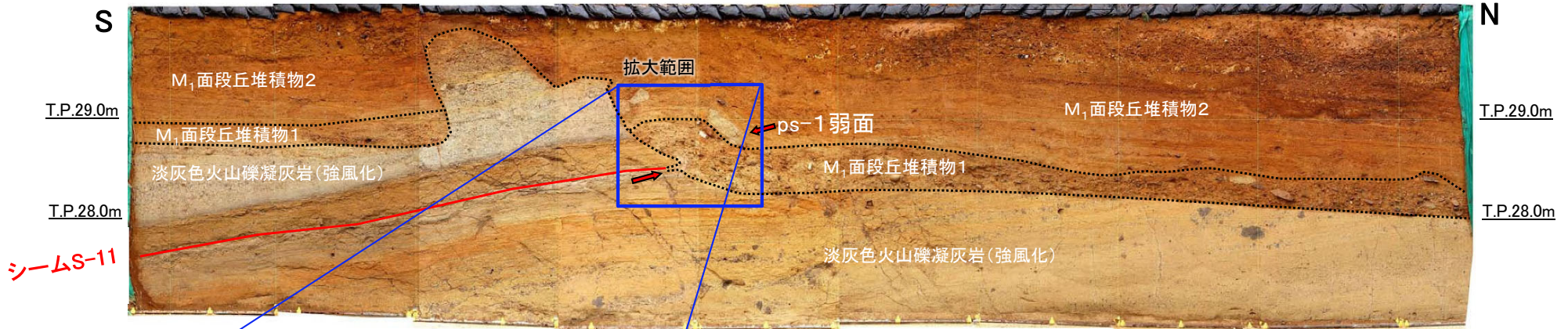
- 敷地前面の現在の海岸には淡灰色火山礫凝灰岩が分布し、波浪により過去の強風化部は侵食され消失し、ほぼ新鮮部が分布する。
- 現在の海岸と同様に段丘堆積物が堆積した時期には淡灰色火山礫凝灰岩に強風化部はなく、陸化後に強風化部が形成されたものと考えられる。
- なお、本地点の岩盤にはTs-1~Ts-3トレンチ付近と同様に2段の平坦な面(平坦面A及び平坦面B)が認められ、沖へ向かって緩やかに傾斜している。

7.2 第四紀における変状弱面の形成時期の検討(4/5)

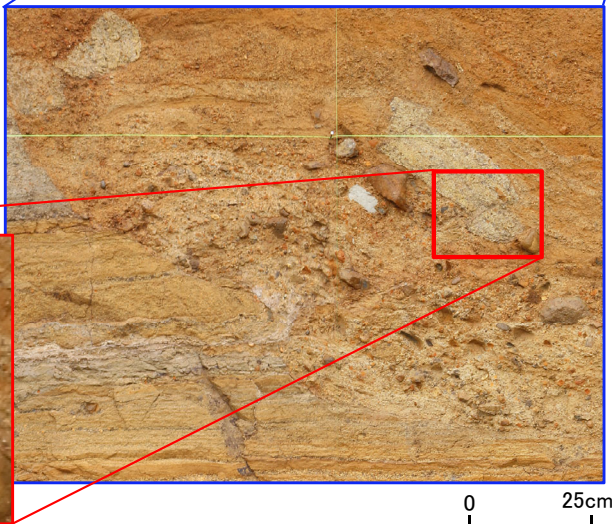
コメントNo.S2-138

第804回審査会合
資料1-1 P.4-123 一部修正

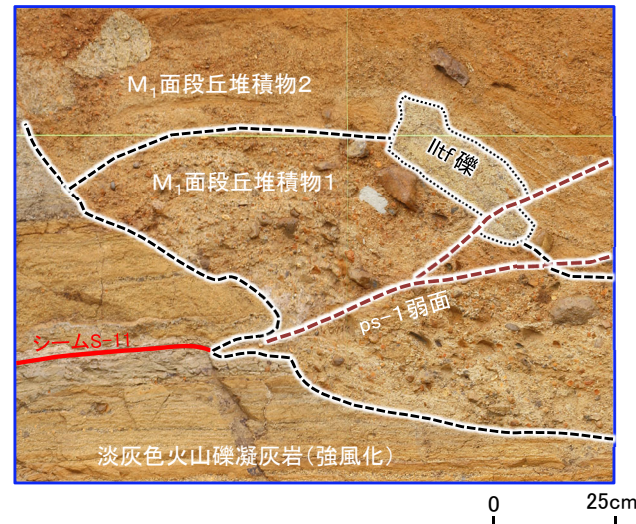
強風化部の形成時期に関する検討(2/2): 風化部の形成と変状弱面の形成時期との関係

Ts-7トレンチ西側法面
〔追加観察面(H30.11)〕

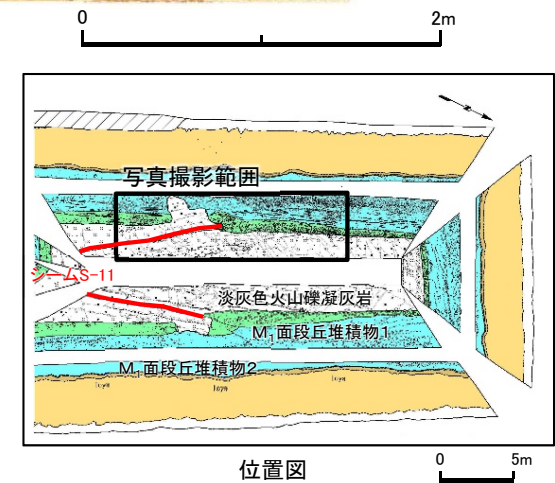
lltf礫拡大写真



拡大写真(解釈線なし)



拡大写真(解釈線有り)



位置図

注) 本写真は、設置変更許可申請時(H26.12)より数10cm奥側の観察面で、第646回審査会合以降に追加取得したデータ。

- Ts-7トレンチ西側法面の段丘堆積物中に分布する淡灰色火山礫凝灰岩礫(lltf礫)は、付近に分布する淡灰色火山礫凝灰岩の岩盤から分離したもので、堆積時には岩盤及び礫は新鮮^{*}であった。
- 法面ではlltf礫は強風化し軟質化しているが、一方で、緻密で硬質な段丘礫は風化が進行しておらず、同じ環境にあってもlltf礫のみが著しい風化を受けている。
- 拡大写真に示すlltf礫はps-1弱面により切断されている。変状弱面の延長上に新鮮なlltf礫が分布する場合、変状弱面が礫を迂回するか別の場所に生じるが、lltf礫は強風化し周囲の段丘堆積物と同程度に軟質化していたため、lltf礫をほぼ直線的に切断して変状弱面が形成されたものと考えられる。
- したがって、変状弱面は、新鮮な岩盤の陸化後1万年程度の期間で岩盤の風化が著しく進行し(本編資料P.4-64参照)、その後形成されたものと考えられる。

^{*} 海岸では、過去の低海水準に形成されていた風化部は波浪により侵食され消失するため、岩盤はほぼ新鮮部のみから成る(P.7-9参照)。なお、塩類風化により岩盤表面は機械的に剥離・細粒化するものの、岩石内部の顕著な軟質化はない。

7.2 第四紀における変状弱面の形成時期の検討(5/5)

文献による岩石の風化速度の検討

地質	対象	調査地域	環境条件	風化性状	風化速度	出典
砂岩・玄武岩・安山岩	河成段丘礫層	日本	段丘堆積物中	風化殻形成	20-50 $\mu\text{m}/1000\text{年}$	栗山ほか(2006) ⁷⁾
安山岩	海成段丘礫層	日本			40 $\mu\text{m}/1000\text{年}$	濱田(2012) ⁸⁾
玄武岩 安山岩	岩石	アメリカ西部17地点			礫層中	玄武岩 4-8 $\mu\text{m}/1000\text{年}$ 安山岩 4-8 $\mu\text{m}/1000\text{年}$
玄武岩質火山ガラス	火山灰堆積層	富士山山麓	スコリア堆積物中	変質層形成	2-3 $\mu\text{m}/1000\text{年}$	Arai et al.(1988) ¹⁰⁾
黒曜石	石器	エジプト, エクアドル, メキシコ他	ローム層中	水和層形成	0.5-2.8 $\mu\text{m}/1000\text{年}$	Friedman & Smith (1960) ¹¹⁾
黒曜石	石器	北海道			1.3-1.4 $\mu\text{m}/1000\text{年}$	Katsui & Kondo (1965) ¹²⁾

強風化部の形成時期について検討するため、文献に示されている岩石の風化速度について整理した。

- ・ 淡灰色火山礫凝灰岩の風化は、気泡及び割れ目の表面から軽石の火山ガラスのスメクタイト化が進行するため、陸化後1万年程度の期間において、数百 μm 程度の風化の進行によって軽石粒子の骨格を構成する薄い火山ガラスはほぼすべて風化し(P.8-9参照)、強風化部が形成されたものと考えられる。
- ・ なお、風化速度は地質条件や調査対象とした岩石が置かれていた環境条件によって異なるが、地表面に露出しない環境条件での風化速度は最大でも50 $\mu\text{m}/1000\text{年}$ 程度であり、重要な安全機能を有する施設の供用期間中に影響を及ぼす風化は生じない。

7.3 変状弱面の変位方向と第四紀の応力場との関係(1/5)

pd系弱面の走向・傾斜と条線の関係及び多重逆解法による応力場の推定(Ts-6法面)

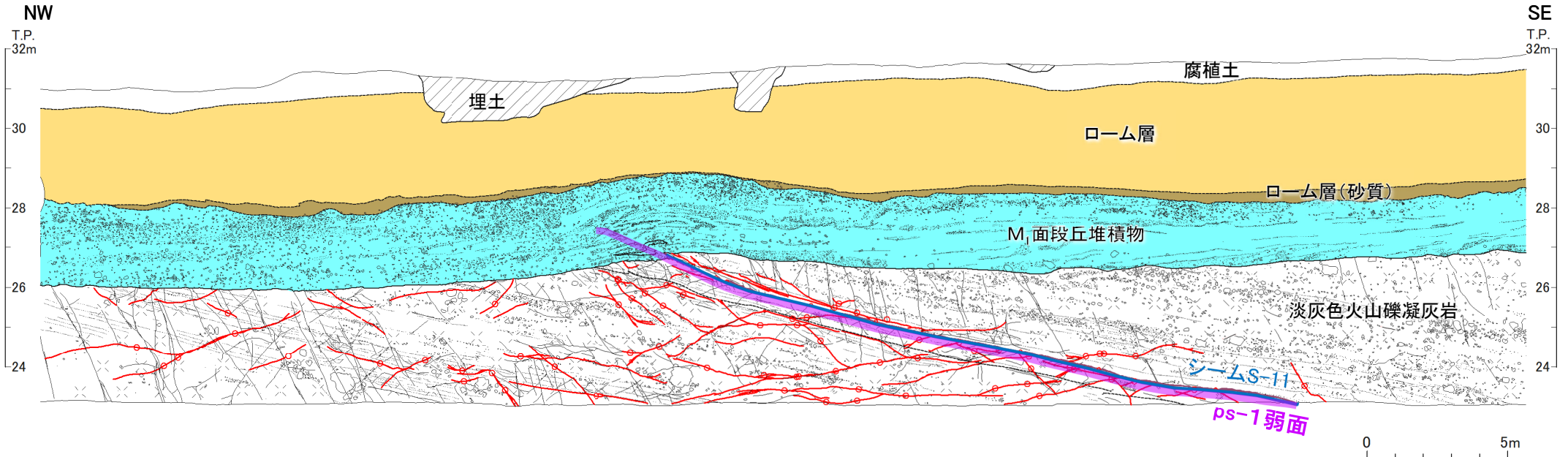
[本編資料4.2章(3)に関する基礎データ]

- Ts-6法面に分布するpd系弱面の走向・傾斜と条線との関係及び多重逆解法による応力場の解析結果



7.3 変状弱面の変位方向と第四紀の応力場との関係(2/5)

Ts-6法面のpd系弱面(1/4):計測位置



- Ts-6法面において、pd系弱面の走向・傾斜及び条線を測定した。
- 条線の方法はほぼ最大傾斜方向で、上盤が上方に変位するセンスを示す。

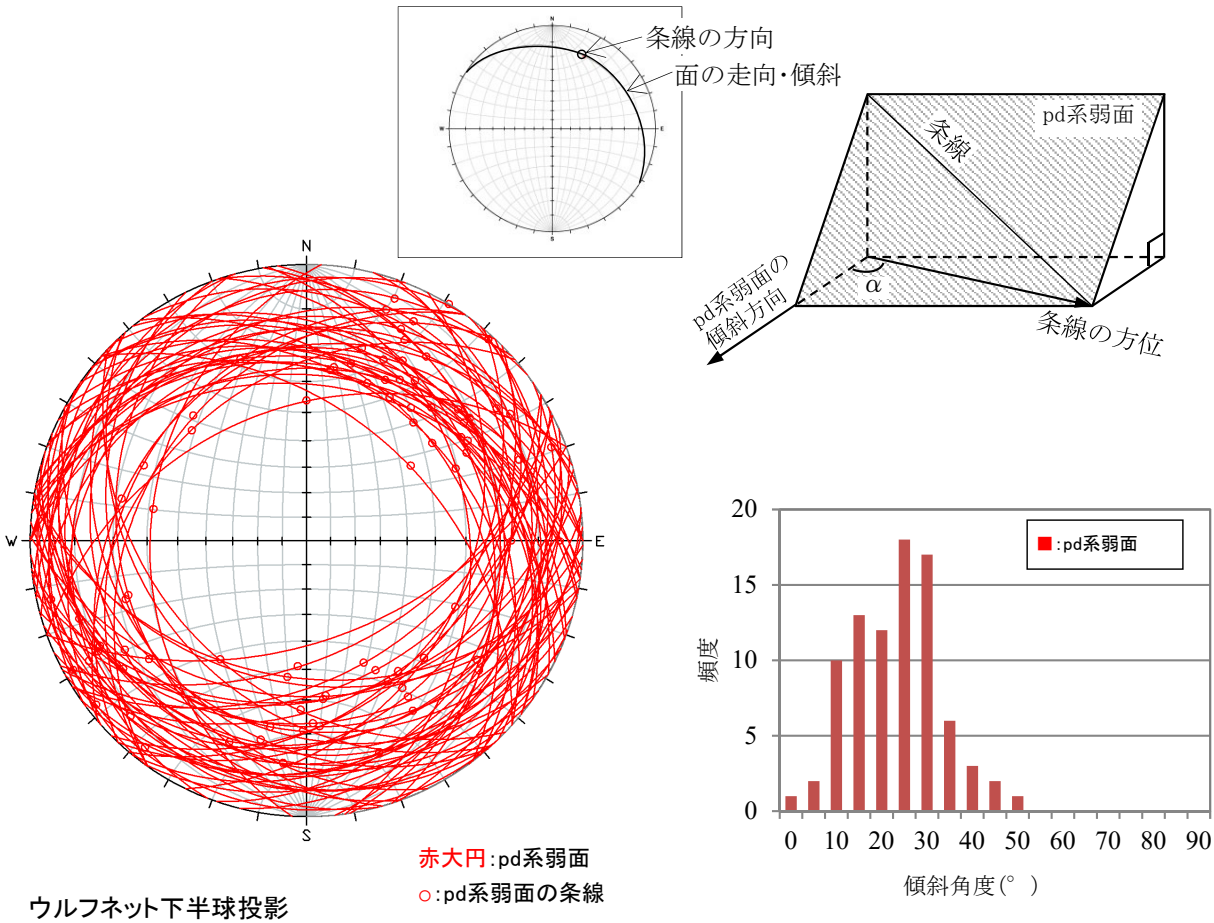
凡 例

第四紀 埋土 腐植土 ローム層 ローム層(砂質) M ₁ 面段丘堆積物	埋土 腐植土 ローム層 ローム層(砂質) M ₁ 面段丘堆積物	新第三紀 中新世 易形層 上層	淡灰色火山礫凝灰岩 粗粒凝灰岩	地層境界	シーム
				地質境界	ps-1弱面
				変位を伴う不連続面及び節理	礫
				段丘堆積物中の不連続面	葉理
				pd系弱面	走向・傾斜と条線を計測したpd系弱面



7.3 変状弱面の変位方向と第四紀の応力場との関係(3/5)

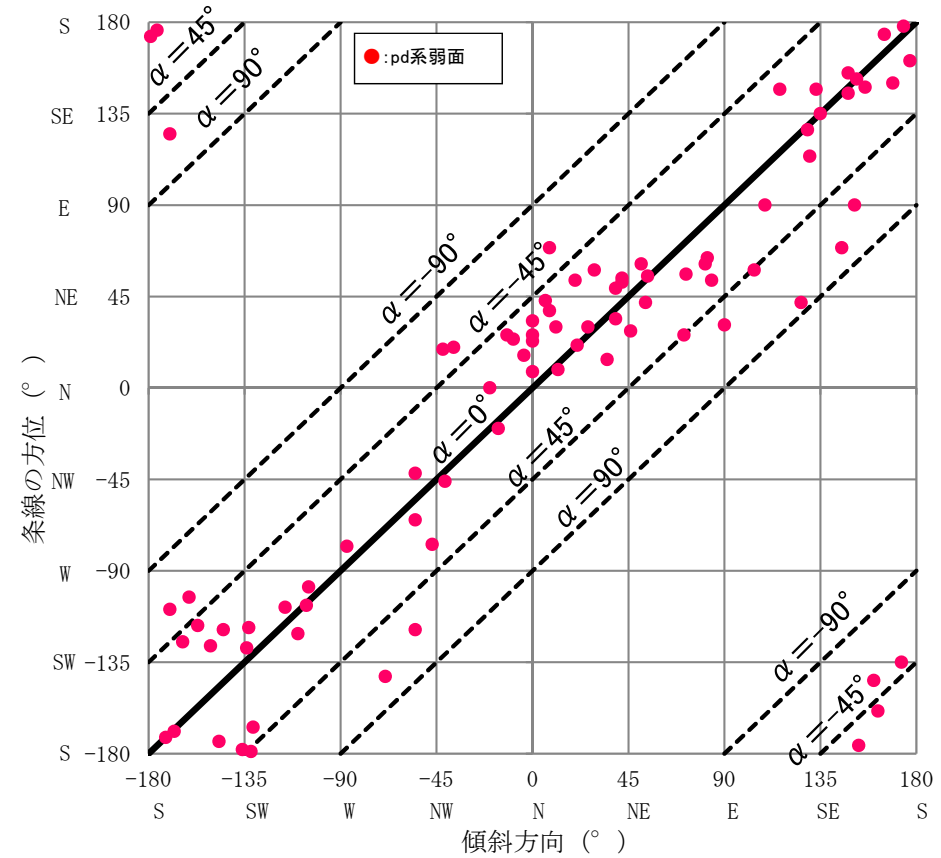
Ts-6法面のpd系弱面(2/4): 走向・傾斜と条線との関係



ウルフネット下半球投影

① pd系弱面と条線のウルフネット投影図

② pd系弱面の傾斜角度の分布



③ pd系弱面の傾斜方向と条線の方位との関係

- pd系弱面は、 $10^\circ \sim 35^\circ$ 程度の傾斜で走向は様々(①, ②)であるが、条線はほぼ最大傾斜方向を示す(①, ③)。
- 上盤の変位方向は上方に変位するセンスを示し、一定の方向を示さない。
- 第四紀の最大主応力軸の方向である東西に条線が卓越する傾向は認められない。
- 以上のことから、Ts-8トレンチ(本編資料P.4-74参照)と同様に、pd系弱面の変位は広域応力場で生じた構造的なものではないと判断される。



7.3 変状弱面の変位方向と第四紀の応力場との関係(5/5)

Ts-6法面のpd系弱面(4/4): 多重逆解法によるミスフィット角の解析結果

計測 No	pd系弱面 (°)		条線 (°)		変位 センス	応力場に対するミスフィット角 (°)		
	方位角	傾斜角	方位角	傾斜角		最適解	① ②	
33	90	0	31	0	逆	16	117	142
54	226	2	232	2	逆	180	78	15
51	305	5	241	2	右横ずれ	119	85	29
86	199	6	257	3	逆	98	97	26
29	215	7	241	6	逆	49	76	3
78	323	7	20	4	逆	18	130	100
118	255	8	262	8	逆	12	88	5
31	227	9	242	9	逆	25	70	1
35	173	9	225	6	逆	75	68	17
25	54	10	55	10	逆	8	62	67
93	291	10	218	3	右横ずれ	105	38	56
39	126	10	42	1	右横ずれ	61	99	130
65	71	10	26	7	逆	32	96	107
114	151	11	90	5	逆	42	59	95
37	104	12	58	8	逆	26	73	88
14	177	12	161	12	逆	2	2	42
47	145	12	69	3	右横ずれ	58	78	108
71	351	12	24	10	逆	13	81	82
60	203	13	243	10	逆	50	73	18
48	213	13	186	12	逆	17	13	45
69	318	14	19	7	逆	34	170	89
52	129	14	127	14	逆	14	14	32
64	250	15	239	15	逆	10	47	18
110	196	15	235	12	逆	47	65	18
43	348	15	26	12	逆	18	51	79
91	360	15	33	13	逆	18	47	79
57	190	16	251	8	逆	68	83	41
75	156	18	148	18	逆	0	4	25
108	162	18	201	14	逆	45	44	20
22	109	18	90	17	逆	3	40	43
76	39	18	49	18	逆	11	42	32
82	46	18	28	17	逆	13	66	6
87	356	19	16	18	逆	5	36	58
67	81	19	61	18	逆	6	53	43
72	84	20	53	17	逆	16	61	53
77	344	20	340	20	逆	21	46	31
92	360	20	23	19	逆	9	29	60
61	39	20	34	20	逆	3	52	13
53	192	21	191	21	逆	4	21	16
109	209	21	233	19	逆	29	53	7
26	229	21	193	17	逆	28	5	48
44	244	21	252	21	逆	12	52	3
88	8	21	69	11	逆	49	11	96

計測 No	pd系弱面 (°)		条線 (°)		変位 センス	応力場に対するミスフィット角 (°)		
	方位角	傾斜角	方位角	傾斜角		最適解	① ②	
41	184	22	176	22	逆	3	10	21
59	20	22	53	19	逆	26	14	63
119	254	22	253	22	逆	2	45	8
46	174	23	178	23	逆	7	16	8
3	51	23	61	23	逆	15	30	7
12	72	23	56	22	逆	3	48	33
16	133	23	147	22	逆	21	4	2
90	11	23	30	22	逆	9	25	52
4	313	24	283	21	逆	46	8	8
45	305	24	295	24	逆	26	21	7
68	29	24	58	21	逆	25	14	49
73	35	24	14	23	逆	19	59	3
19	12	25	9	25	逆	10	40	29
11	360	26	26	24	逆	12	8	56
80	360	26	8	26	逆	5	25	40
2	21	27	21	27	逆	4	35	25
6	135	28	135	28	逆	5	8	10
30	305	28	318	27	逆	4	32	26
84	26	28	30	28	逆	1	30	24
85	6	28	43	23	逆	24	3	64
36	116	29	147	25	逆	37	12	14
55	82	29	64	28	逆	3	42	33
8	42	30	52	30	逆	12	23	12
42	228	30	181	21	逆	37	12	57
56	53	30	42	30	逆	2	40	16
97	130	30	114	29	逆	9	24	24
115	165	30	174	30	逆	8	14	2
40	148	30	145	30	逆	1	4	9
50	169	30	150	29	逆	16	8	23
102	319	30	314	30	逆	22	1	16
117	273	31	282	31	逆	6	41	6
23	8	31	38	27	逆	18	1	54
34	181	31	173	31	逆	6	7	14
63	152	34	152	34	逆	1	0	4
116	224	34	182	27	逆	30	8	51
98	190	35	125	16	逆	60	44	68
5	188	37	188	37	逆	0	16	6
79	148	38	155	38	逆	4	3	3
95	340	38	0	36	逆	0	7	42
58	42	41	54	40	逆	14	14	9
28	153	45	184	41	逆	19	23	24
27	160	50	216	34	逆	38	46	48

最適解の応力場

σ1軸: 方位角 203.3°, 伏角 3.9°
 σ3軸: 方位角 53.4°, 伏角 85.6°
 応力比(Φ): 0.77

①の応力場

σ1軸: 方位角 345.0°, 伏角 15.1°
 σ3軸: 方位角 146.1°, 伏角 74.1°
 応力比(Φ): 0.90

②の応力場

σ1軸: 方位角 115.8°, 伏角 5.3°
 σ3軸: 方位角 239.0°, 伏角 80.5°
 応力比(Φ): 0.70

ミスフィット角20° 以上

どの応力場に対してもミスフィット角の大きなデータが多く、pd系弱面の変位は一定の応力場によるものではないと考えられる。

変状弱面のノンテクトニックな形成要因*に関する検討

〔本編資料4.2章に関する基礎データ及び補足説明〕

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討

- 変状弱面と文献に示されたノンテクトニック断層との類似性に基づく, 変状弱面の形成要因に関する検討(P.8-3~P.8-6)

8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討

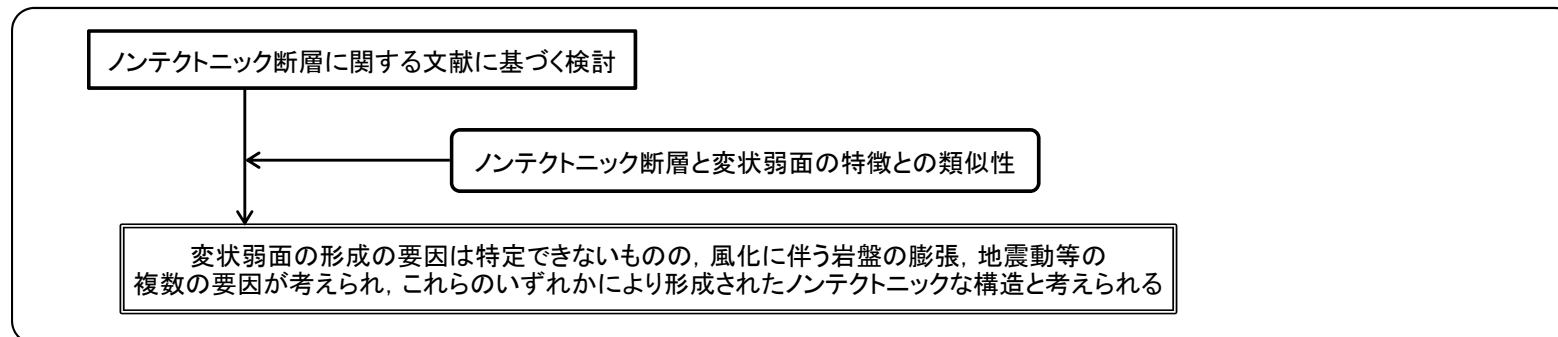
- 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく, 風化に伴う鉱物, 岩石組織等の変化に関する検討(P.8-7~P.8-21)
- 風化に伴う岩盤の膨張率に関する文献に基づく, 強風化部の膨張率と変状の観察結果及び模型実験結果との整合性の検討(P.8-22~P.8-39)

*: 形成要因とは, 地質の成因的なもので, 地質解釈に依存することを説明する際に用いる。

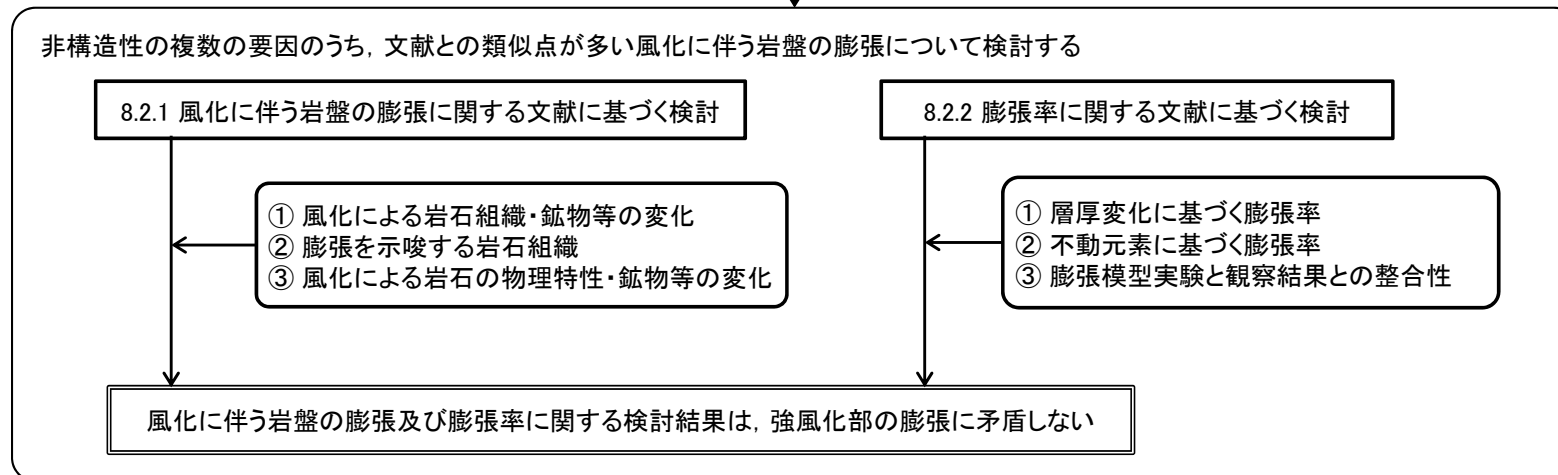
8. 変状弱面のノンテクトニックな形成要因に関する検討

形成要因に関する検討の流れ

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討



8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討



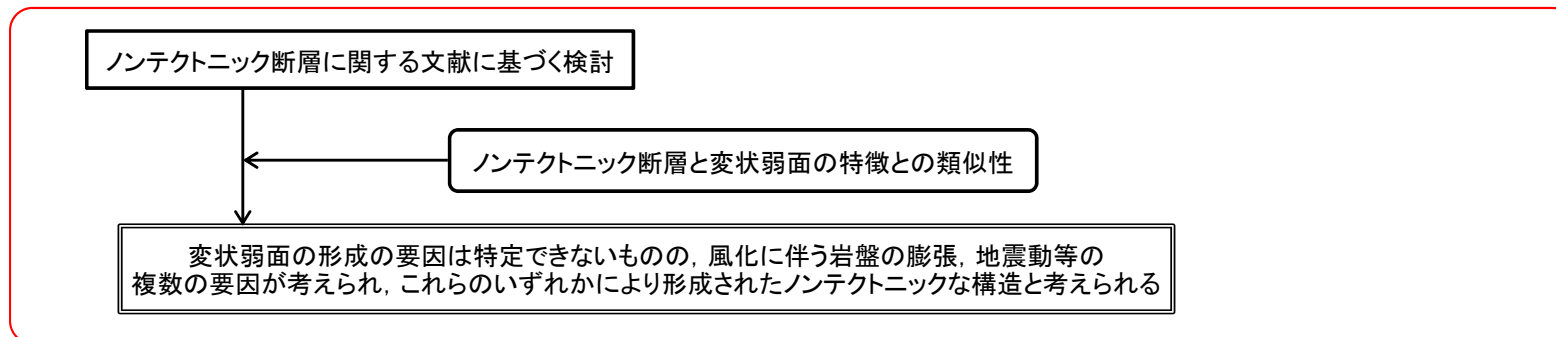
変状弱面のノンテクトニックな形成要因のまとめ

- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、非構造的な複数の要因(風化に伴う岩盤の膨張、地震動等)によるものと考えられる。
- 強風化部の形成に伴う岩盤の膨張は分析・観察結果と矛盾しないが、地震動等の影響も否定できない。
- これら複数の要因は、少なくとも変状弱面が非構造的なものだと判断されること(本編資料P.4-78参照)と矛盾しない。

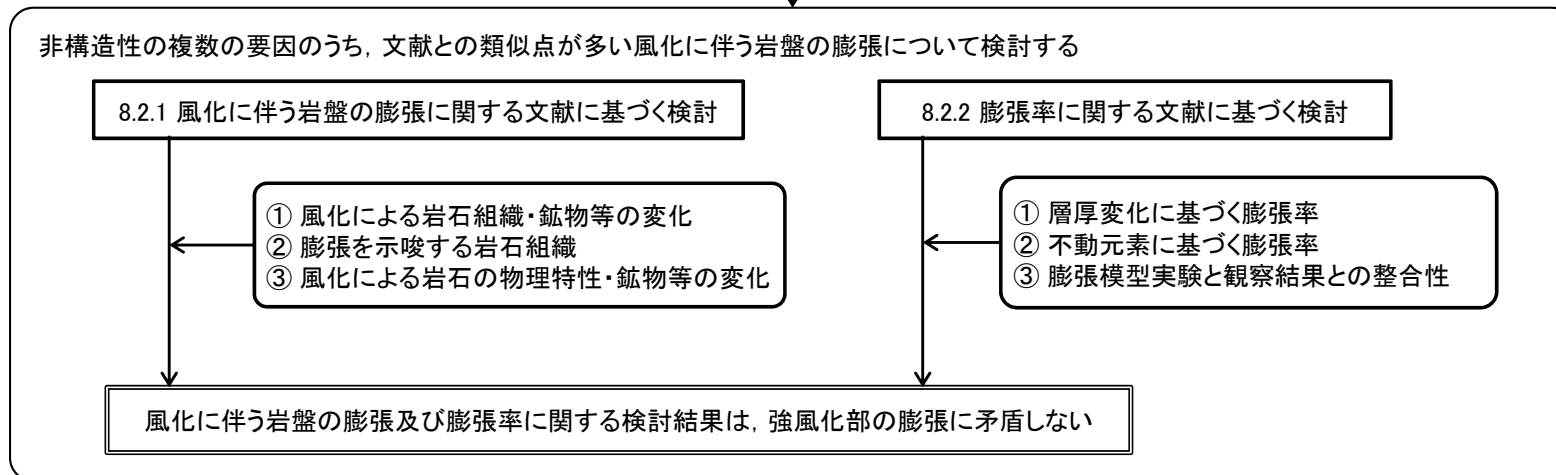
8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討(1/4)

検討の流れ

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討



8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討



変状弱面のノンテクトニックな形成要因のまとめ

- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、非構造的な複数の要因(風化に伴う岩盤の膨張、地震動等)によるものと考えられる。
- 強風化部の形成に伴う岩盤の膨張は分析・観察結果と矛盾しないが、地震動等の影響も否定できない。
- これら複数の要因は、少なくとも変状弱面が非構造的なもの判断されること(本編資料P.4-78参照)と矛盾しない。

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討(2/4)

ノンテクトニック断層に関する文献に基づく検討

*: ノンテクトニック断層研究会(2015)¹⁴⁾に基づいて作成

ノンテクトニック断層の形成要因*		ノンテクトニック断層の特徴*	大間地点の変状弱面の特徴 (○類似点, ×相違点)		形成要因の適合性
重 力	地すべり	<ul style="list-style-type: none"> ・地すべり地形を示すことが多い ・頭部で正断層, 末端部で逆断層, 側部で雁行亀裂 ・すべり面下盤に比べて上盤の顕著な破碎 ・開口割れ目の発達 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・変状弱面周辺に地すべり地形は認められない ・正断層型の変位センスは認められない ・シーム・不連続面上盤に顕著な破碎・開口節理は認められない 	低
	多重山稜・線状凹地	<ul style="list-style-type: none"> ・尾根付近に尾根にほぼ平行に分布 ・正断層が多い 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・変状弱面周辺に顕著な尾根は認められない ・正断層型の変位センスは認められない 	低
	バレーバルジング	<ul style="list-style-type: none"> ・応力解放に伴って形成され, 谷地形に分布が限定される 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・変状弱面周辺に顕著な谷地形は認められない 	低
	堆積物の圧密	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の凹凸に対応した沈下 ・正断層の形成 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の上面の凹凸と関係あり ・正断層型の変位センスは認められない 	低
	堆積時のスランピング	<ul style="list-style-type: none"> ・特定の層内に分布が限定される ・顕著な地層の塑性変形を伴う 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の上面の凹凸と関係あり 	低
火山活動	カルデラ	<ul style="list-style-type: none"> ・カルデラ縁部に沿う正断層の形成 	×	<ul style="list-style-type: none"> ・敷地近傍に後期更新世以降に活動した火山は認められない 	低
	マグマの貫入	<ul style="list-style-type: none"> ・マグマの貫入圧力による正断層・逆断層の形成 			
	火山体の荷重沈下	<ul style="list-style-type: none"> ・環状または弧状の正断層の形成 			
地震動	<ul style="list-style-type: none"> ・深度5m程度までで消滅することが多い ・深部に向かって次第に低角度化することが多い ・開口割れ目を伴う高角度の正断層が多い ・断層面の走向が斜面方向に規制されることが多い 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・変状弱面は数m程度の深度で消滅する(本編資料P.4-94, 4-96参照) ・変状弱面は深部で低角度化することが多い(P.5-21参照) ・正断層型の変位センスは認められない ・変状弱面の分布は斜面の方向とは無関係 ・Ts-6, 8の様々な走向の変状弱面の分布は地震動では説明困難 	中	
岩盤の風化・劣化による体積変化	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱物の風化変質, 割れ目形成・開口等による体積増加に伴って形成 ・断層は下方・側方に連続せず, 変位量が変化 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・変状弱面は強風化部の近傍で認められ, 変位量は強風化部の厚さと関連(P.2-79参照) ・変状弱面は局所的で側方に連続しない(P.5-11参照) ・変状弱面は下方に連続しない(本編資料P.4-94, 4-96参照) ・Ts-6, 8の様々な走向の変状弱面の分布は岩盤の膨張を示唆(P.7-15, 本編資料P.4-75参照) 	高	

文献に示されたノンテクトニック断層の形成要因とその特徴を整理し, 大間地点の変状弱面の特徴との類似性について検討した。
 ・変状弱面の特徴は, 「岩盤の風化・劣化による体積変化」(膨張)によって形成された断層の特徴と良く一致するが, 「地震動」による断層の特徴などとも類似点が認められ, 地震動も形成要因として否定できない。



8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討(3/4)

ノンテクトニック断層と変状弱面の特徴との類似性

*: Hanson et al.(1999)¹⁵⁾に基づいて作成

岩盤の風化(土壌化)に伴う膨張で形成された ノンテクトニックなせん断構造の特徴* (テクトニック断層及び地震動で形成された断層との相違点)	大間地点の変状弱面の特徴 (○類似点, ×相違点)		特徴の 適合性
①せん断構造は膨張性の土壌(岩盤の風化部)に分布が限定される	○	・変状弱面は岩盤の風化部に分布が限定される	高
②せん断構造は未風化の堆積物や岩盤までは連続しない	○	・変状弱面は未風化の岩盤までは連続しない	高
③せん断構造は一般的に広い範囲に分布し、幅の狭いゾーンに分布が限定されることはない	× ○	・変状弱面はシーム付近に分布が限定される ・シーム付近に連続的に分布することはない	中
④せん断構造は基盤岩の断層上に集中して分布することはない	× ○ ○	・変状弱面はシーム付近に分布が限定される ・変状弱面はシーム付近に連続的には分布せず、一部ではシームを変位させている ・変状弱面はcf断層系沿いには分布しない	中
⑤近接して分布するせん断構造に様々なせん断方向のものがみられる	○	・Ts-6, 8において近接して分布するpd系弱面は様々なせん断方向を示す(P.7-15, 本編資料P.4-75参照)	高
⑥せん断構造を側方に追跡すると一定のせん断方向を示さない	○	・ps系弱面は側方に追跡するとせん断方向が一定ではなく、90°程度異なったせん断方向を示す(本編資料P.4-67参照)	高

文献の記述及び検討内容

- ・米国原子力規制委員会のNUREG/CR-5503(Hanson et al.(1999)¹⁵⁾)には、テクトニック断層とノンテクトニック断層の特徴の違いについて記述されている。
- ・ノンテクトニック断層の形成要因として、岩盤の風化(土壌化)に伴って、膨張性の粘土を多く含む土壌には、体積変化に特徴的なせん断構造が岩盤の風化部に形成されることがあり、せん断面には条線や鏡肌が認められることがあるとされている。
- ・このようなせん断構造の特徴は、テクトニック断層及び地震動で形成された地盤の変形の特徴とは異なるとされることから、文献に示されたせん断構造の特徴について、大間地点の変状弱面の特徴との類似性について検討した。

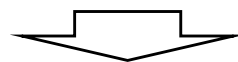
大間地点のデータに基づく検証結果

- ・大間地点の変状弱面の特徴は、文献に示された風化(土壌化)に伴うせん断構造の特徴と良く一致し、風化に伴う岩盤の膨張によって形成されたノンテクトニックな構造と整合性が高い。

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討(4/4)

まとめ

- 変状弱面の特徴は、ノンテクトニック断層研究会(2015)¹⁴⁾に示された形成要因の中で、「岩盤の風化・劣化による体積変化」(膨張)の特徴と良く一致し、「地震動」による断層の特徴などとも類似点が認められる。
- 変状弱面の特徴は、米国原子力規制委員会のNUREG/CR-5503 (Hanson et al.(1999)¹⁵⁾)に示された「風化(土壌化)に伴うせん断構造」の特徴と良く一致し、風化に伴う岩盤の膨張によって形成されたノンテクトニックな構造と整合性が高い。



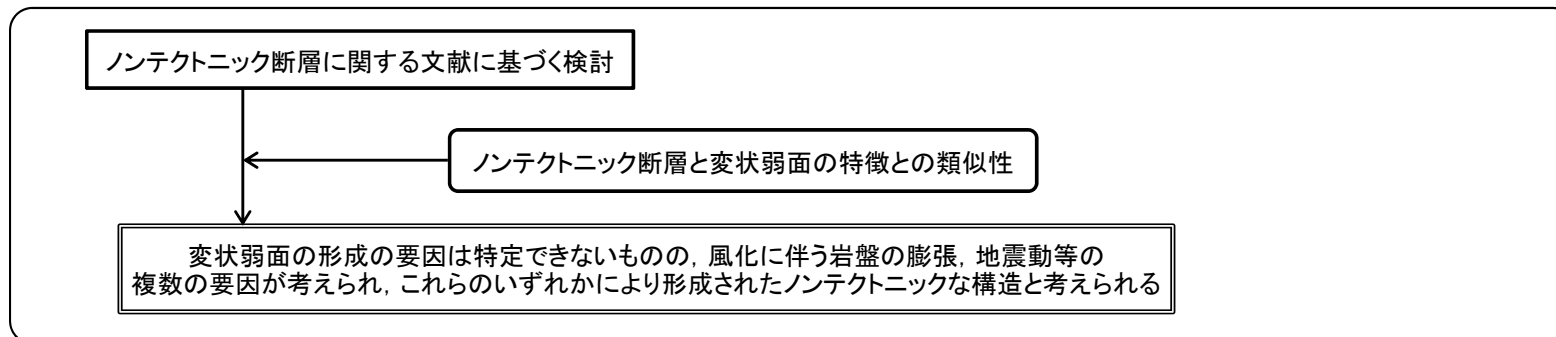
変状弱面の形成の要因は特定できないものの、風化に伴う岩盤の膨張、地震動等の複数の要因が考えられ、これらのいずれかにより形成されたノンテクトニックな構造と考えられる

8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討

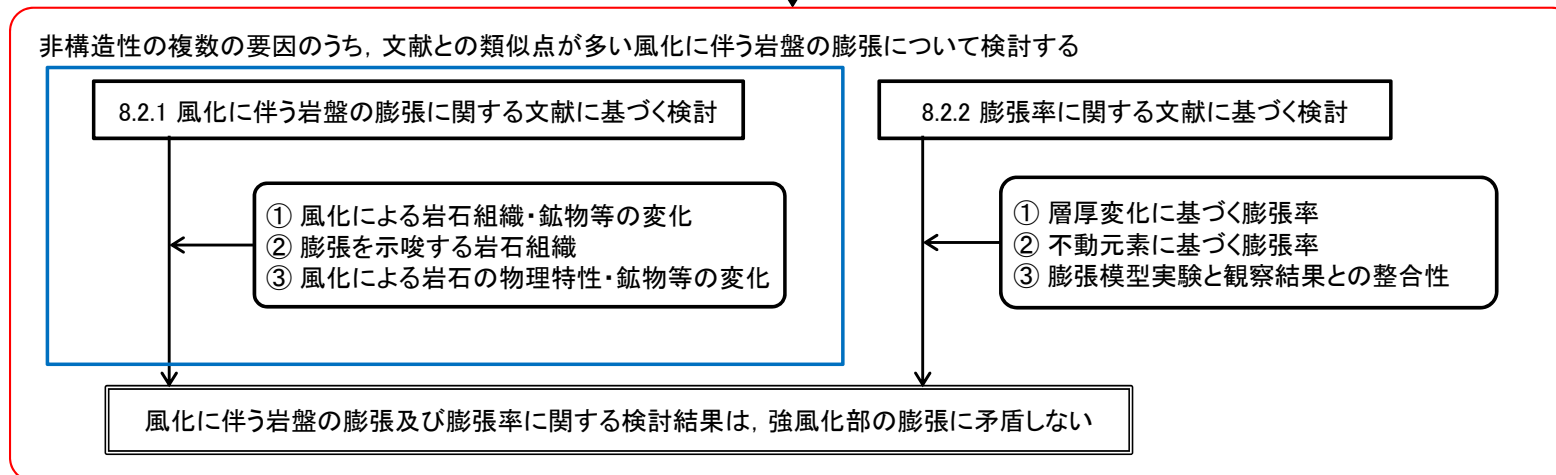
8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(1/15)

検討の流れ

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討



8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討



変状弱面のノンテクトニックな形成要因のまとめ

- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、非構造的な複数の要因(風化に伴う岩盤の膨張、地震動等)によるものと考えられる。
- 強風化部の形成に伴う岩盤の膨張は分析・観察結果と矛盾しないが、地震動等の影響も否定できない。
- これら複数の要因は、少なくとも変状弱面が非構造的なものだと判断されること(本編資料P.4-78参照)と矛盾しない。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(2/15)

文献の記述と大間地点のデータに基づく検討結果

第804回審査会合
資料1-1 P.4-94 一部修正

検討項目	風化に伴う岩盤の膨張に関する文献の記述	大間地点のデータに基づく膨張の要因の検討結果	参照頁
(a)風化に伴うスメクタイトの形成	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の風化に伴うスメクタイトの形成について記載した文献は多い(例えば千木良(1988)¹⁶⁾, 前田ほか(2014)¹⁷⁾等)。鳥居ほか(2006)¹⁸⁾及び米田ほか(1999)¹⁹⁾は, 始新世~中新世の凝灰岩中の火山ガラスの風化によってスメクタイトが形成された可能性が高いとしており, 湯佐ほか(1991)²⁰⁾は880~2800年前のスコリアの火山ガラスの風化により形成されたスメクタイトについて報告している。 岩盤の風化によって形成された膨張性土壌は, スメクタイトの吸水膨張により膨張するとする研究は多い(Chabrilat and Goetz(1999)²¹⁾, Jones and Jefferson (2012)²²⁾, Azam et al. (2013)²³⁾など)。 	<ul style="list-style-type: none"> 文献の記載と同様に大間地点の岩石でも風化によって主に火山ガラスからスメクタイトが形成され, 新鮮部より強風化部ではスメクタイトの量が増加している。 強風化部の膨張は風化によって形成されたスメクタイトの吸水膨張によるものと推定される。 	P.8-9, 8-15, 8-16
(b)風化に伴う岩石組織の破壊	<ul style="list-style-type: none"> Fityus and Smith (2004)²⁴⁾は泥岩を母岩とする膨張性の風化残留土について研究し, 膨張の素因となるスメクタイトのほぼ全ては母岩に元々含まれていたもので, 新たに形成されたものはほとんど無いことを示し, 膨張は岩石組織及び岩石の固結度の物理的な破壊によるものとした。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩石薄片の観察結果によると, 弱風化部から強風化部に風化が進む間に軽石の骨格がバラバラに分断され, 岩石組織が破壊されており, 文献と同様に岩石組織の破壊が岩盤の膨張を生じるきっかけとなっている可能性が考えられる。 	P.8-9, 8-18
(c)岩石組織の破壊と吸水膨張との関係	<ul style="list-style-type: none"> Fityus and Smith (2004)²⁴⁾は, 上記(b)の岩石組織及び岩石の固結度の物理的な破壊による膨張について検討するため, 岩石を粉碎した実験を行い, その結果からもこの様な膨張の要因が支持されるとした。 	<ul style="list-style-type: none"> 大間地点の岩石を粉碎した吸水膨張試験の結果, 風化に伴う岩盤の膨張は, 弱風化部から強風化部への風化の進行による岩石組織の破壊に伴う応力解放及びスメクタイトの吸水膨張によるものと考えられる。 	P.8-19, 8-20

風化に伴う岩盤の膨張に関する文献の記述と大間地点のデータに基づき, 岩盤の膨張の要因について検討した。

- 大間地点の風化に伴う岩盤の膨張は, 風化によって形成されたスメクタイトの吸水膨張及び風化による岩石組織の破壊に伴う応力解放によるものと考えられる。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(3/15)

第804回審査会合
資料1-1 P.4-95 再掲

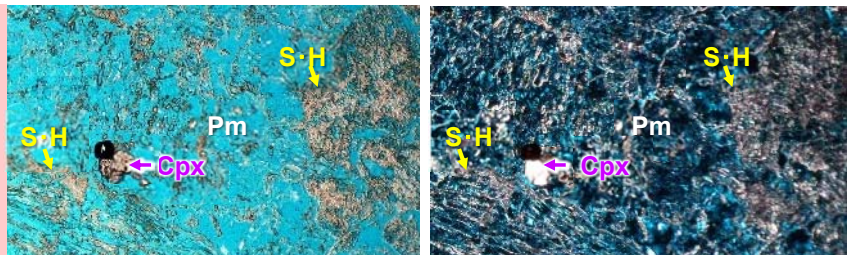


①風化による岩石組織・鉱物等の変化〔薄片・SEM観察〕

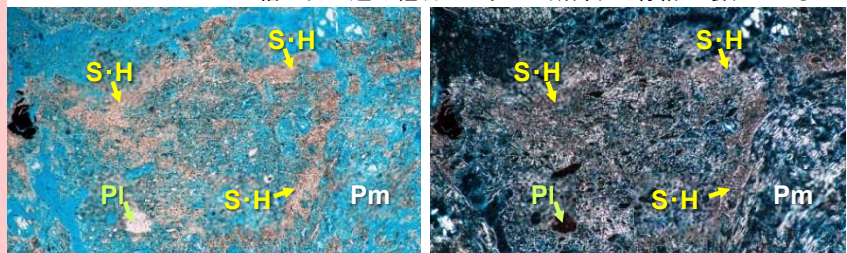
風化区分

オープンニコル 薄片写真 (青色部は樹脂(ブルーレジン)) クロスニコル

強風化部

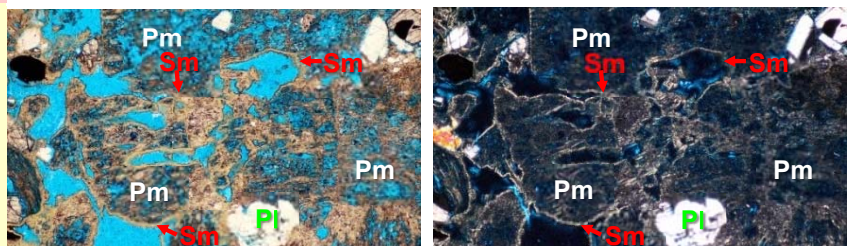


Ts-1-24 2.70m~2.75m 粘土化が進み軽石のガラスは断片化し骨格は壊れている



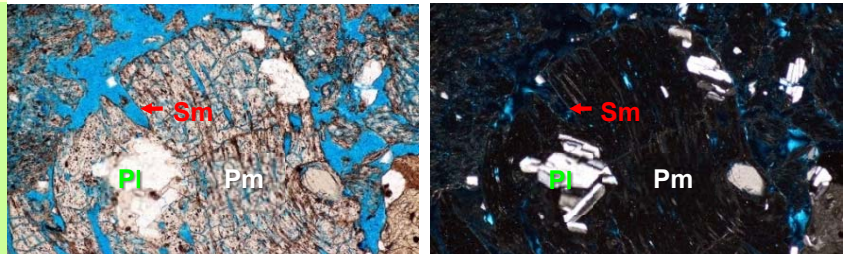
Ts-1-24 3.58m~3.65m スメクタイト・ハロイサイトが軽石のガラスを置換し、軽石の輪郭は不明瞭

弱風化部



Ts-1-26 5.20m~5.25m スメクタイトが厚さを増し、一部で軽石のガラスの骨格を分断

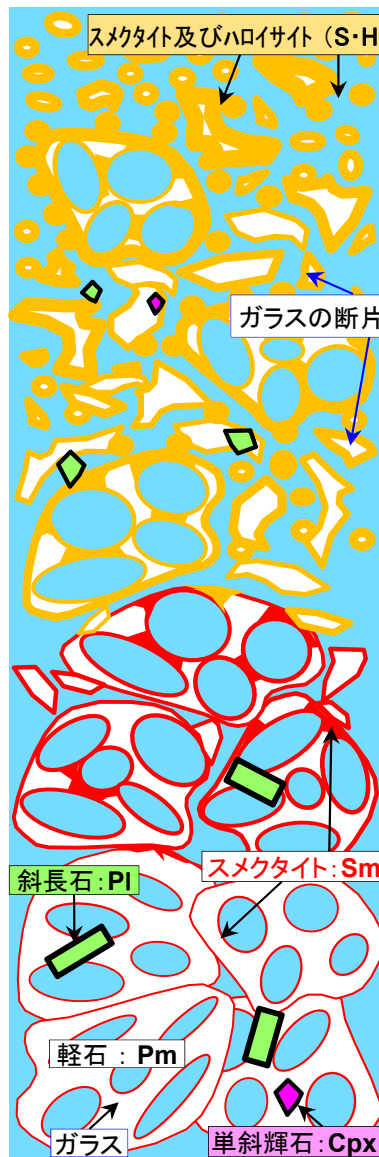
新鮮部



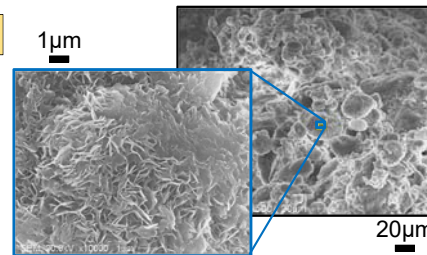
Ts-1-10 2.79m~2.84m 軽石のガラス表面にスメクタイトの薄膜が認められる



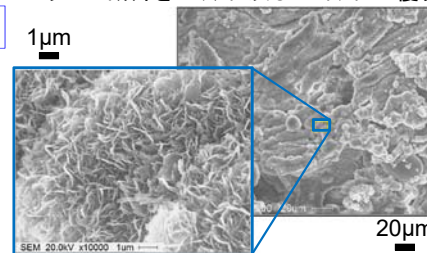
岩石組織のイメージ



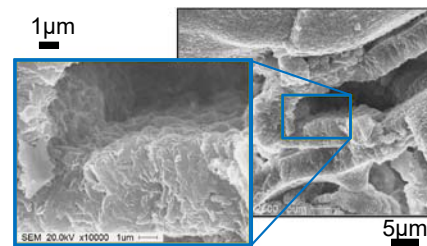
SEM画像



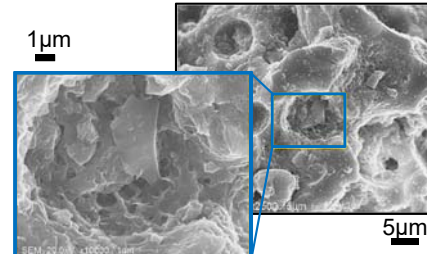
ガラスの断片をスメクタイト及びハロイサイトが覆う



ガラス表面にスメクタイト及びハロイサイトが密集

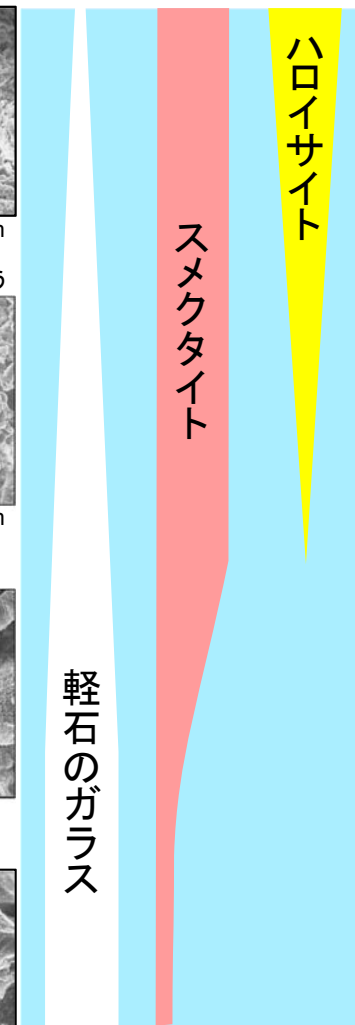


気泡表面のスメクタイト層の厚さ増加



軽石の気泡表面のスメクタイトの薄膜層

岩石組織・鉱物の変化



風化に伴うスメクタイトの増加は千木良(1988)¹⁶⁾、風化に伴うハロイサイトの生成は小口ほか(1993)²⁵⁾などに報告の事例がある。

淡灰色火山礫凝灰岩は主に多孔質な軽石から成り、新鮮部から強風化部にかけて、軽石を構成するガラスの変質が進み、スメクタイトが増加する。弱風化部では軽石のガラスの骨格は保持されているが、強風化部ではガラスの変質が進行し骨格は壊れている。

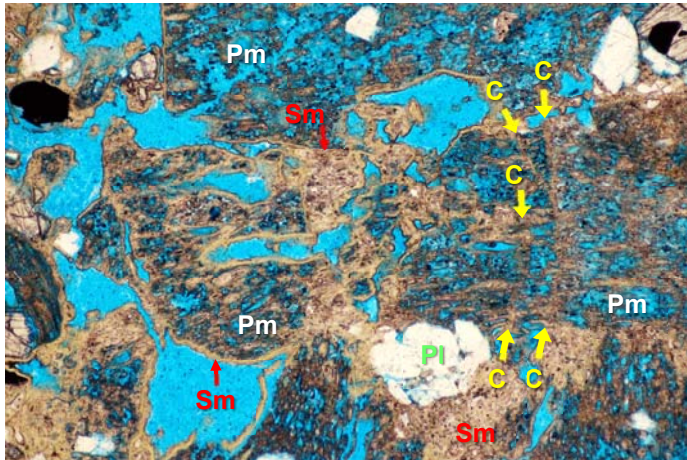
注) 薄片写真の詳細は第615会審査会合資料2-2, P.6-114~P.6-127参照。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(4/15)

②膨張を示唆する岩石組織(1/4):薄片観察の方針

コメントNo.S2-139

淡灰色火山礫凝灰岩に見られる岩石組織の例(青色部は樹脂(ブルーレジン))

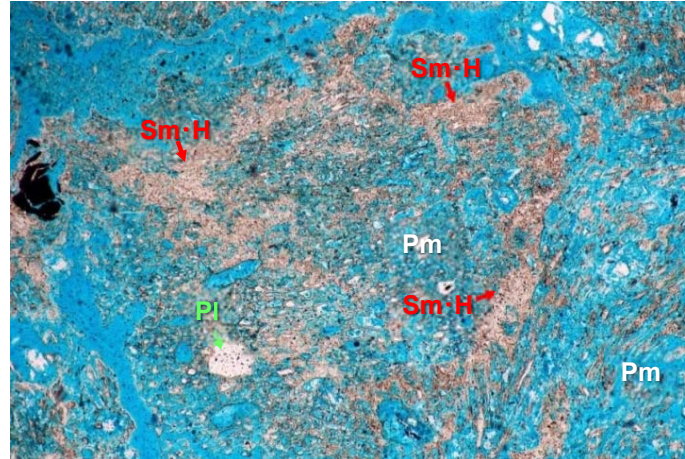


オープンニコル

0 0.5mm

写真1 弱風化部 Ts-1-26 5.20m~5.25m No.26B

軽石(Pm)及び不規則な割れ目(C)の表面で火山ガラスや斜長石(Pl)が溶解し、スメクタイト(Sm)が生成している。

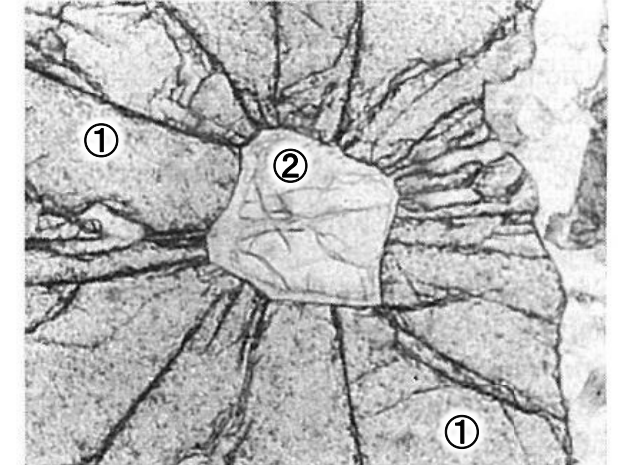


オープンニコル

0 0.5mm

写真2 強風化部 Ts-1-24 3.58m~3.65m No.42A

軽石(Pm)の全体的な粒子形状は保持されているが、割れ目は不明瞭になり、火山ガラスは大部分がスメクタイト・ハロイサイト(Sm·H)に風化変質し、岩石の骨格は分断されている。

膨張によって形成された放射状の割れ目の例
(Wang et al.(1993)²⁶⁾に加筆)

オープンニコル

0 0.1mm

写真3 エクロジャイト中のザクロ石に見られる放射状の割れ目

均質で硬質なザクロ石(①)の内部に閉じ込められていたコーサイト-石英包有物(②)が膨張した結果、ザクロ石中に②を中心とした放射状の割れ目が形成されている。

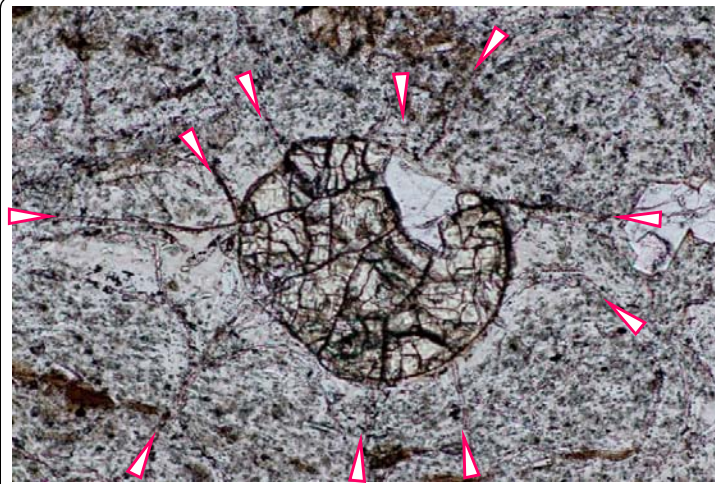
- 変状が認められる易国間層の淡灰色火山礫凝灰岩は、主に多孔質な軽石から成る空隙の多い岩石で、弱風化部(写真1)では軽石の火山ガラスに不規則な割れ目(C)が認められ、風化により火山ガラスの表面及び割れ目沿いにスメクタイトが生成しており、強風化部(写真2)では割れ目は不明瞭になり、火山ガラスは大部分がスメクタイト・ハロイサイトに風化変質している。
- 風化に伴う岩石の膨張は、主に弱風化部が強風化部に変化する際に生じると考えられ(P.8-20参照)、膨張を示唆する岩石組織は、その後の風化の進行によって強風化部では不明瞭になっていると考えられることから、弱風化部を対象として薄片観察を行う方針とする。
- 風化は火山ガラス等の表面から進行し、鉱物内部の包有物に膨張が生じた事例とは異なるため、写真3のような放射状の割れ目が風化によるスメクタイトの生成に伴って形成されることは考え難いが、鉱物とその周辺の火山ガラスの割れ目の分布・性状に注目し、膨張を示唆する可能性がある岩石組織について記載し検討を行う。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(5/15)

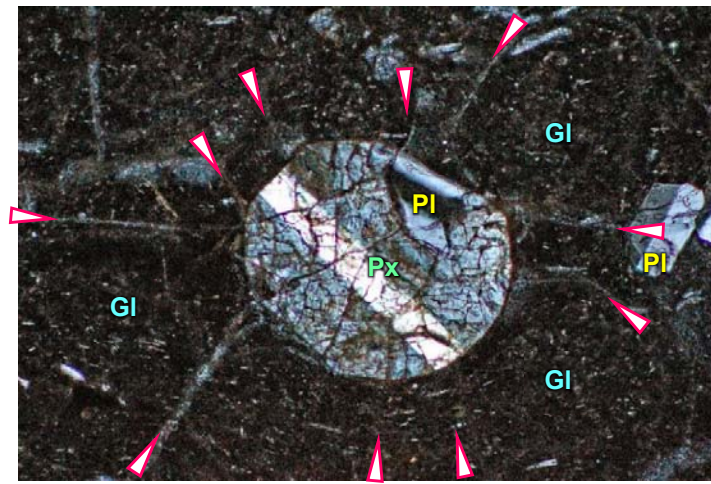
コメントNo.S2-139



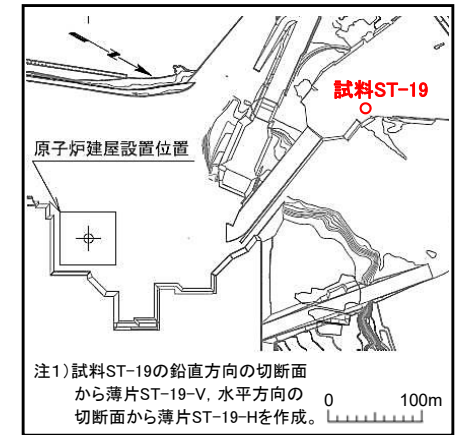
②膨張を示唆する岩石組織(2/4):輝石とその周囲の火山ガラス:観察箇所A及びB



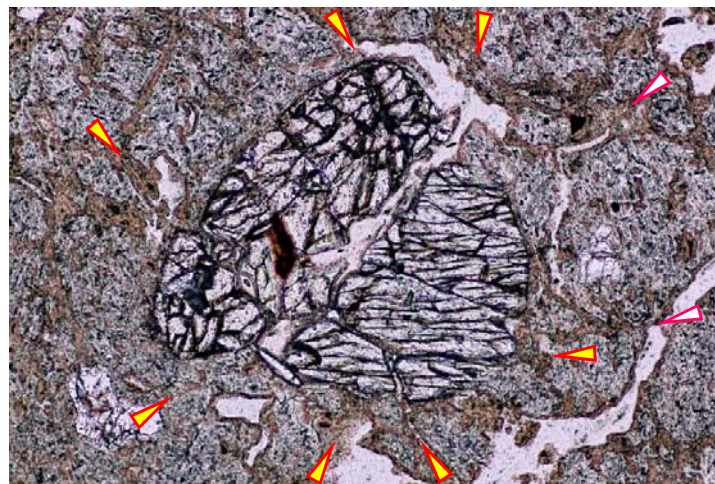
薄片写真① オープンニコル



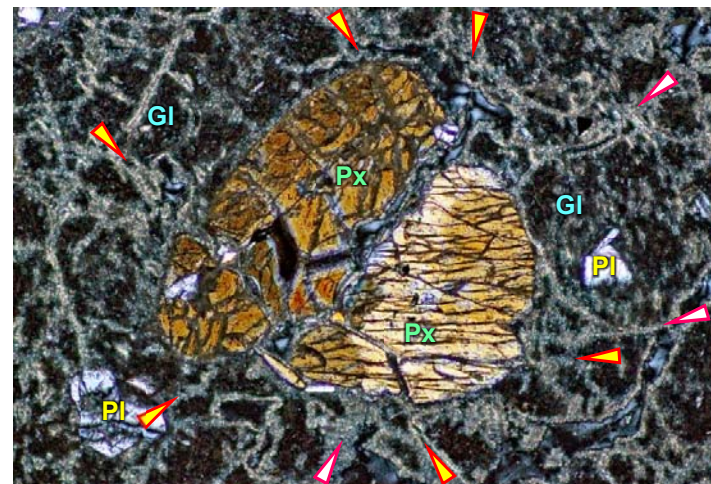
薄片写真② クロスニコル 0 0.2mm



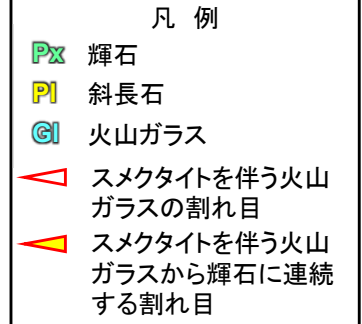
試料採取位置図

観察箇所A
(薄片ST-19-V)

薄片写真③ オープンニコル



薄片写真④ クロスニコル 0 0.5mm

観察箇所B
(薄片ST-19-H)

注2) Delvigne (1998)²⁷⁾は風化に伴って鉱物に割れ目が形成されることによって体積膨張が生じるとしている。

- 観察箇所Aでは淡灰色火山礫凝灰岩を構成する軽石中の輝石の斑晶に、スメクタイトは伴わない不規則な割れ目が認められる。輝石の周囲の火山ガラスには輝石を中心とした放射状の割れ目が形成されており、割れ目にはスメクタイトが僅かに生成している(薄片写真①, ②)。
- 観察箇所Bでは観察箇所Aより風化が進んでおり、輝石の周囲の火山ガラスにはスメクタイトを伴う網目状の割れ目が形成されており、それらの一部は火山ガラスから輝石の中に連続する。輝石の周囲の火山ガラスに形成されたスメクタイトを伴う割れ目の幅は観察箇所Aに比べて拡大している(薄片写真③, ④)。
- これらの岩石組織は、スメクタイトを伴う割れ目の形成によって膨張が生じたことを示唆する可能性がある。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(6/15)

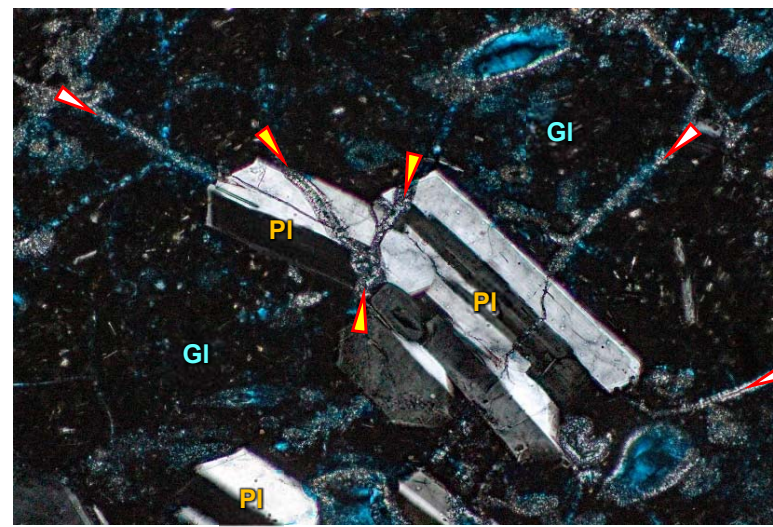
コメントNo.S2-139



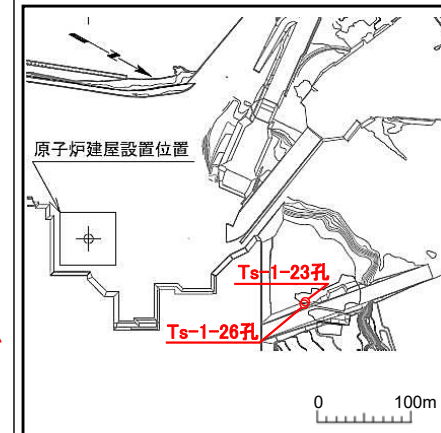
②膨張を示唆する岩石組織(3/4):斜長石とその周囲の火山ガラス:観察箇所C及びD



薄片写真① オープンニコル

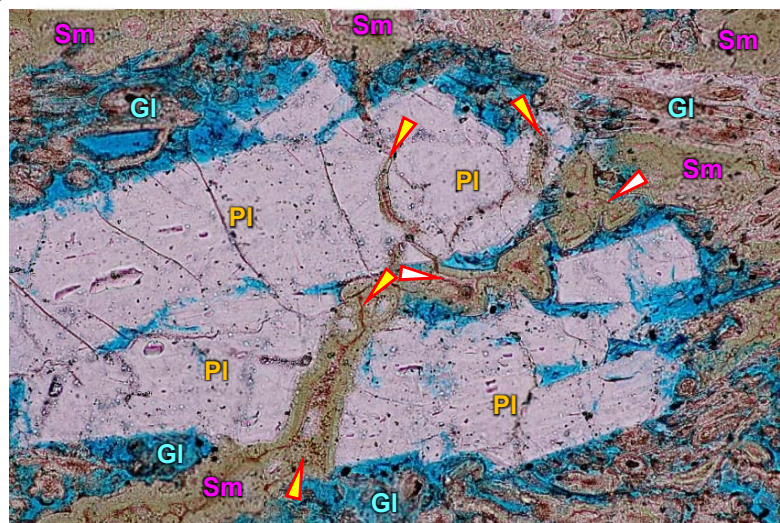


薄片写真② クロスニコル

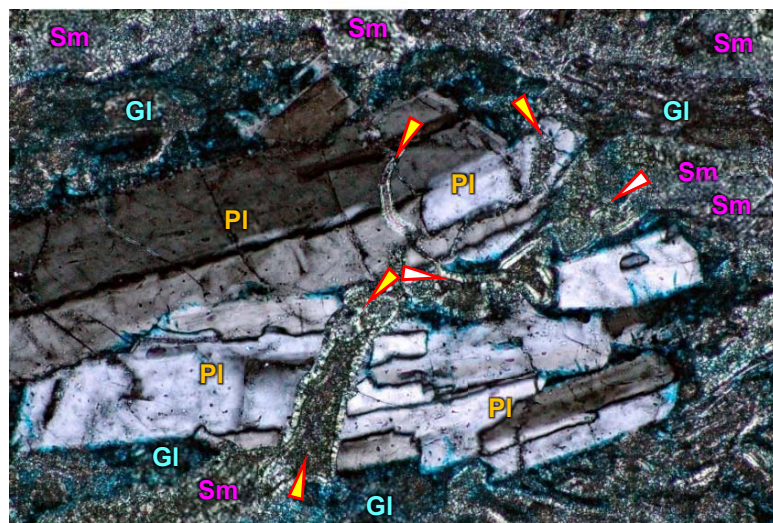


試料採取位置図

観察箇所C
(Ts-1-23孔,
深度5.48-5.53m)



薄片写真③ オープンニコル



薄片写真④ クロスニコル

凡 例	
PI	斜長石
GI	火山ガラス
Sm	スメクタイト生成部
	スメクタイトを伴う火山ガラスの割れ目
	スメクタイトを伴う斜長石の割れ目

注) 青色部は樹脂(ブルーレジン)。

観察箇所D
(Ts-1-26孔,
深度5.20-5.25m)

- 観察箇所Cでは僅かに風化した軽石の中に斜長石の斑晶があり、斜長石の周囲の火山ガラスにはスメクタイトを伴う割れ目(最大幅約0.01mm)が形成されている。*印で示した割れ目では斜長石の結晶の外形にズレ(矢印)が認められる(薄片写真①, ②)。
- 観察箇所Dでは観察箇所Cより風化が進み、割れ目の幅は、約0.04mm(観察箇所Cの約4倍)で、風化の進行により割れ目幅が拡大している(薄片写真③, ④)。
- これらの岩石組織は、スメクタイトを伴う割れ目の形成によって膨張が生じたことを示唆する可能性がある。

②膨張を示唆する岩石組織(4/4):まとめ

弱風化部の淡灰色火山礫凝灰岩の薄片観察の結果、以下のような風化に伴う膨張を示唆する可能性がある岩石組織が認められた。

【輝石の斑晶の周辺の火山ガラスの放射状の割れ目】

- 軽石中の輝石の斑晶に割れ目が認められ、周囲の火山ガラスには輝石を中心とした放射状の割れ目*が形成されている(*:Wang et al.(1993)²⁶⁾に示された放射状の割れ目の形状と類似)。

【軽石粒子の網目状の割れ目】

- 火山ガラスにスメクタイトを伴う網目状の割れ目が発達した軽石粒子が認められ、このような粒子では風化に伴って割れ目が分離し、岩石の膨張が生じている可能性がある。

【斜長石の斑晶の割れ目】

- 軽石中の斜長石の斑晶及びその周囲の火山ガラスにスメクタイトを伴う割れ目が形成され、風化の進んだ箇所ではスメクタイトを伴う割れ目の幅が大きく、一部の割れ目では斜長石の結晶の外形にズレが認められる。



8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(8/15)

③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(1/7): 試料採取位置(Ts-1トレンチ付近)

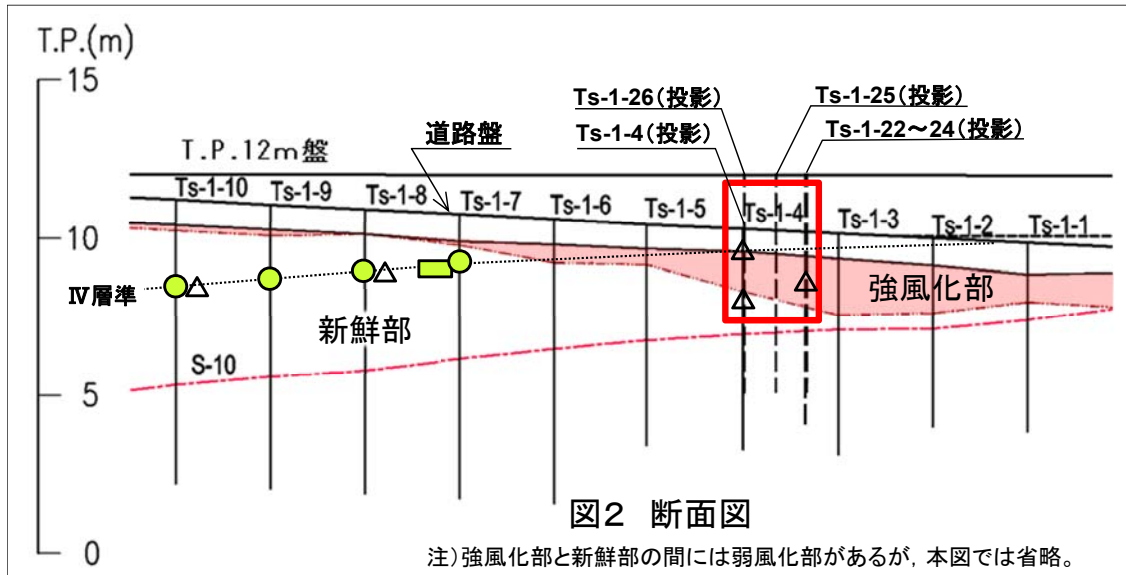
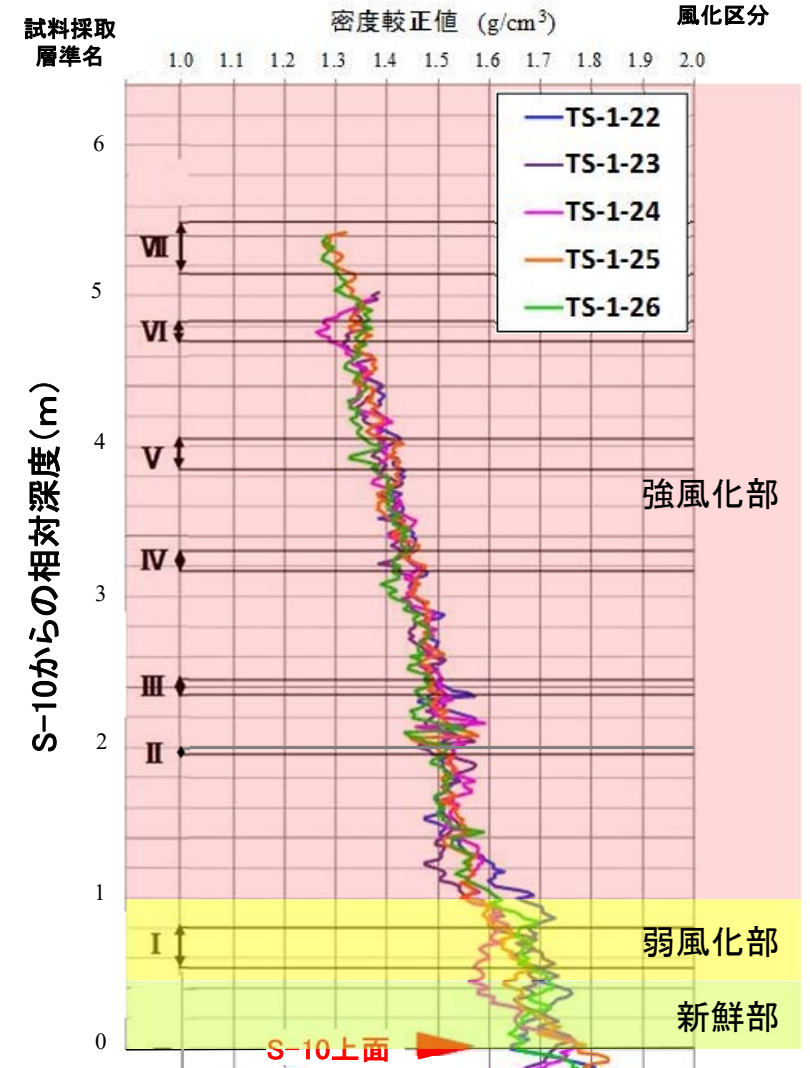
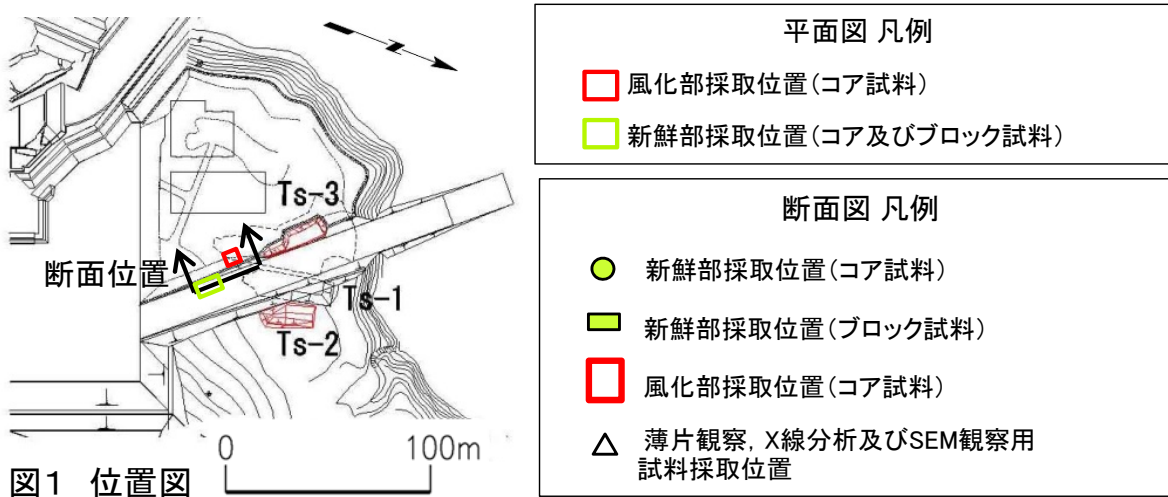


図3 密度検層結果

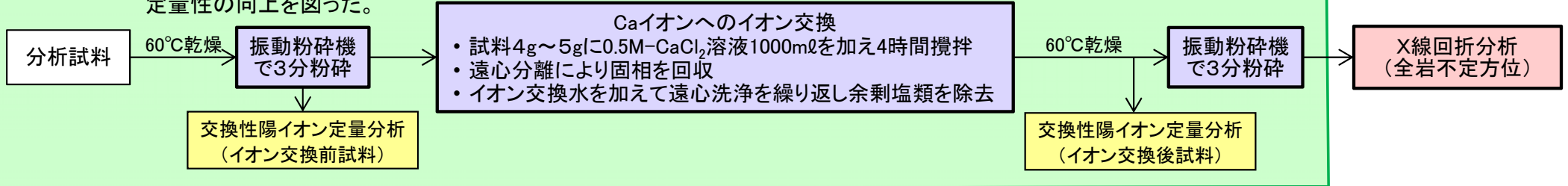
- 変状弱面の形成要因の検討のため、変状が認められたTs-1トレンチ付近から、シームS-10上盤の淡灰色火山礫凝灰岩の新鮮部(9試料)、弱風化部(5試料)及び強風化部(28試料)を採取した(図1, 2)。
- 風化部については、シームS-10上面を基点として下位から風化程度に応じてI~VIIの層準(I層準:弱風化部, II~VII層準:強風化部)を設定してコア試料を採取した(図3)。新鮮部の試料はIV層準を代表としてコア試料及びブロック試料を採取した(図2)。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(9/15)

③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(2/7): X線分析(不定方位)

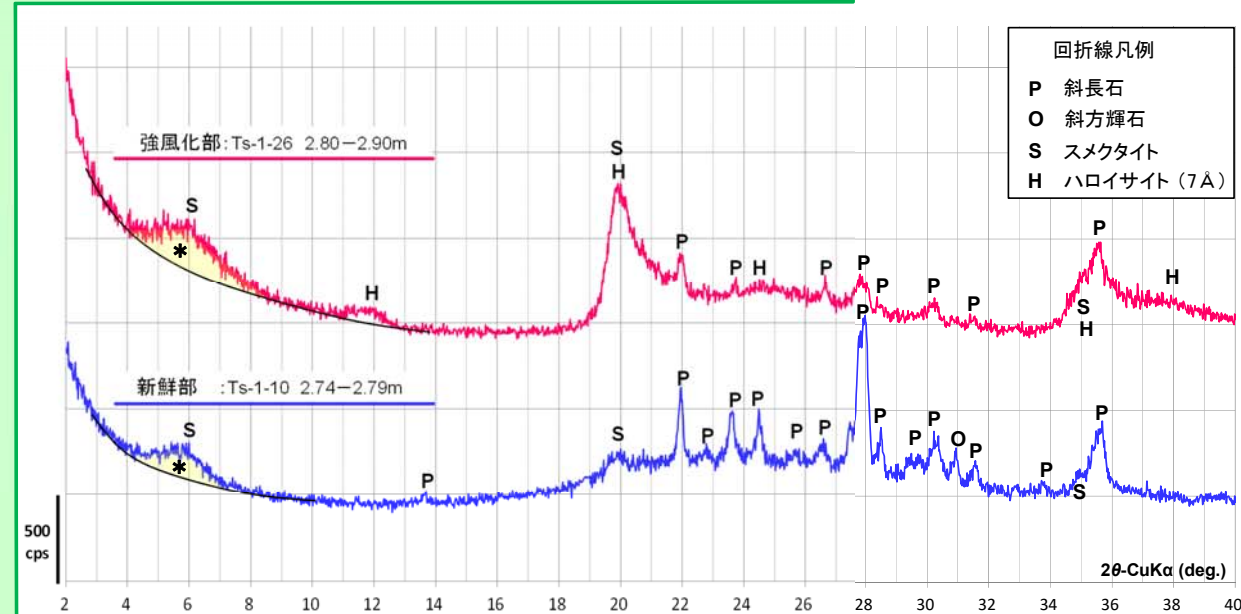
前処理

粉末X線回折分析によるスメクタイトの回折線強度は、スメクタイトの結晶粒径(荒井・名取(1991)²⁸⁾及び交換性陽イオンの種類(岩崎(1979)²⁹⁾)に依存するため、Caイオンへのイオン交換及び一定時間粉碎した試料についてX線分析を実施し、定量性の向上を図った。



Caイオンへのイオン交換の確認
(交換性陽イオン定量分析結果)

セミクロショーレンベルガー法:
1N-酢酸アンモニウム溶液による置換後、
原子吸光光度計で陽イオンを定量



X線回折チャート(イオン交換・一定時間粉碎後)

注) 各風化区分のX線回折チャートは
P.8-16参照。

- ・淡灰色火山礫凝灰岩を対象に、スメクタイトの定量性向上の前処理(Caイオンへのイオン交換及び一定時間粉碎)を行い、X線分析を実施した。
- ・新鮮部ではスメクタイトと斜長石が、強風化部ではスメクタイト、ハロサイト、斜長石(回折線強度は新鮮部より大幅に低下)が検出される。
- ・強風化部のスメクタイトの回折線強度(ピーク面積*)は、新鮮部の2倍程度となっている。風化に伴うスメクタイトの結晶度の低下により、X線分析による新鮮部と強風化部でのスメクタイト含有量の定量的な比較は困難であるが、この結果は、薄片及びSEMによる観察結果(P.8-9参照)と整合的で、新鮮部から強風化部にかけてスメクタイトが増加しているものと考えられる。

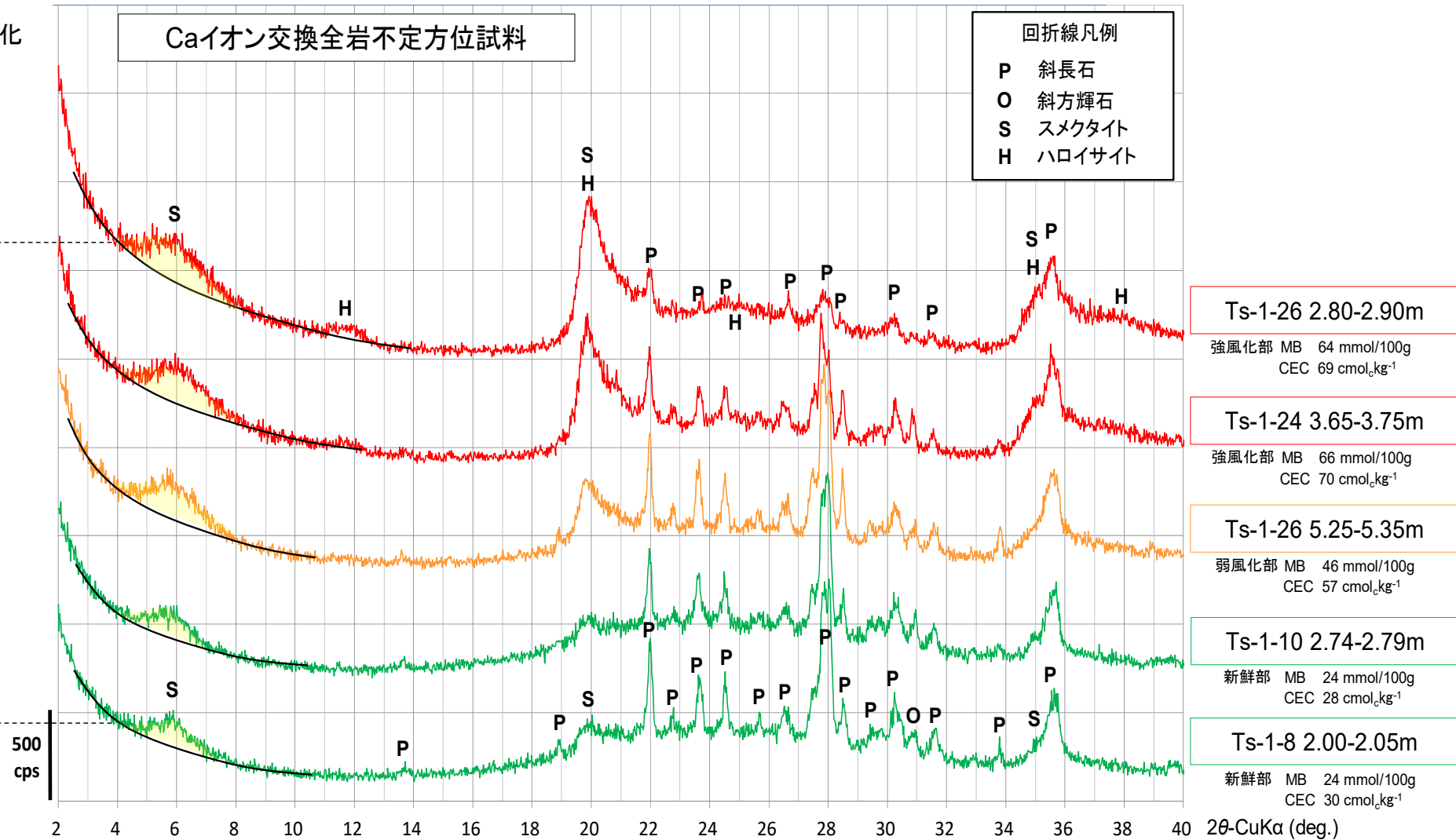
8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(10/15)

第804回審査会合
資料1-2 P.112 再掲

③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(3/7):X線回折チャート(Ts-1トレンチ付近)

風化による鉱物の変化

スメクタイト
ハロイサイト
斜長石



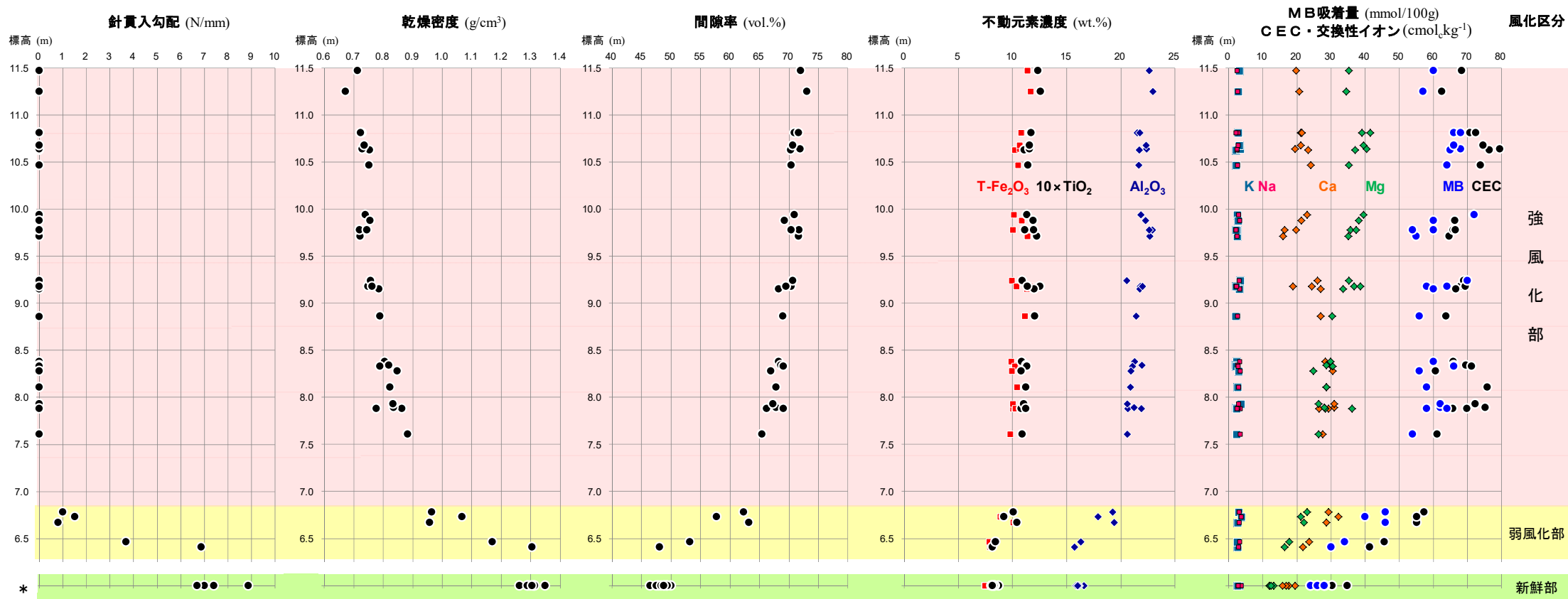
- ・ スメクタイトの底面反射の強度は、新鮮部から強風化部にかけて増加する。
- ・ ハロイサイトの底面反射は強風化部で出現し、その強度は浅部に向かって増加する。
- ・ 斜長石の回折線の強度は風化に伴って低下し、溶解傾向にある。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(11/15)

第804回審査会合
資料1-2 P.113 再掲

③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(4/7):

針貫入勾配, 乾燥密度, 間隙率, MB, CEC(Ts-1トレンチ付近)



*: 新鮮部試料の採取位置・標高はP.8-14の断面図参照。

注) 全岩化学分析結果はP.8-30, 密度試験はP.8-31参照。

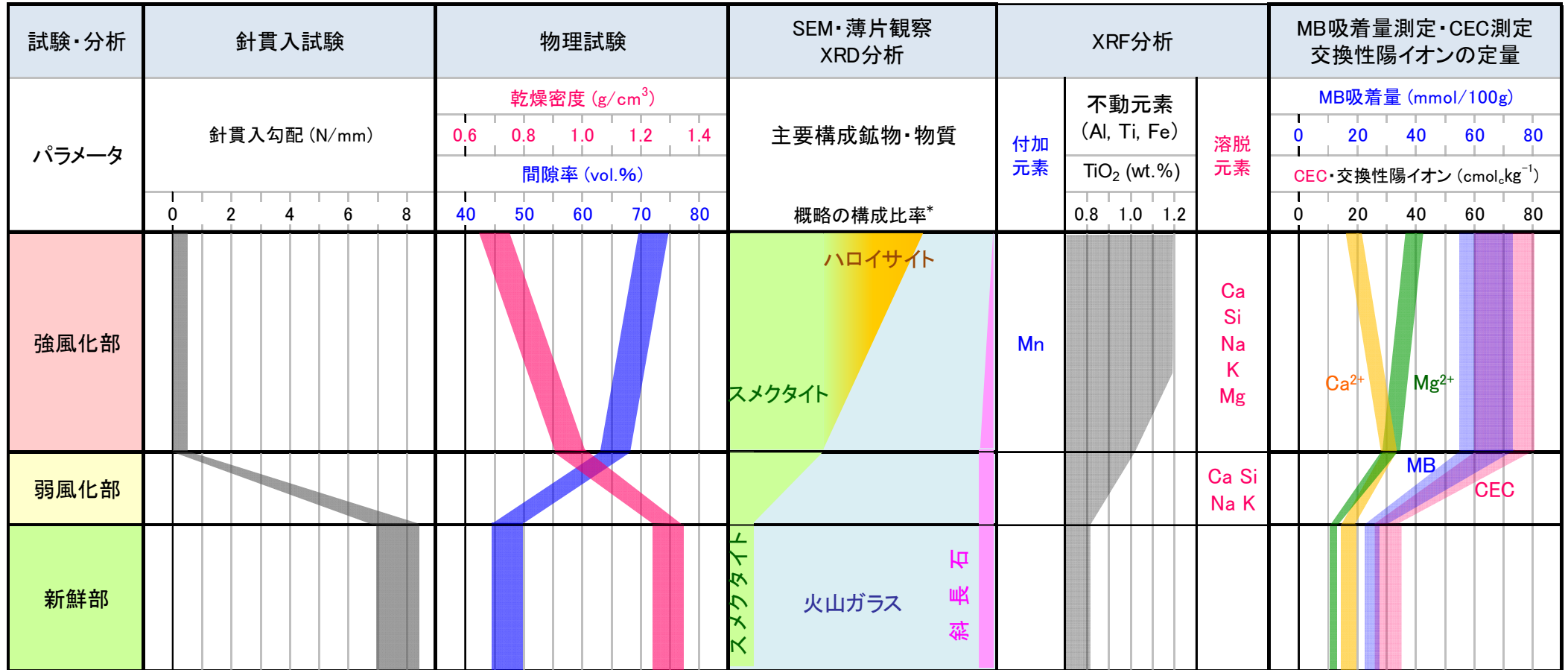
- 針貫入勾配は新鮮部から強風化部下部にかけて低下し, 強風化部でほぼ0 N/mmとなり, 岩石はほとんど強度を失っている。
- 新鮮部から強風化部上部にかけて, 乾燥密度は減少し, 間隙率は増加する。
- 不動元素濃度は, 新鮮部から強風化部下部にかけて増加するが, 強風化部中での変化は少ない。
- MB(メチレンブルー)吸着量及びCEC(陽イオン交換容量)は, 新鮮部から強風化部下部にかけて増加するが, 強風化部中では変化しない。スメクタイトの交換性陽イオンは, Ca型からMg型へ変化する。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(12/15)

第804回審査会合
資料1-1 P.4-97 再掲



③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(5/7):試験・分析結果のまとめ(概念図)



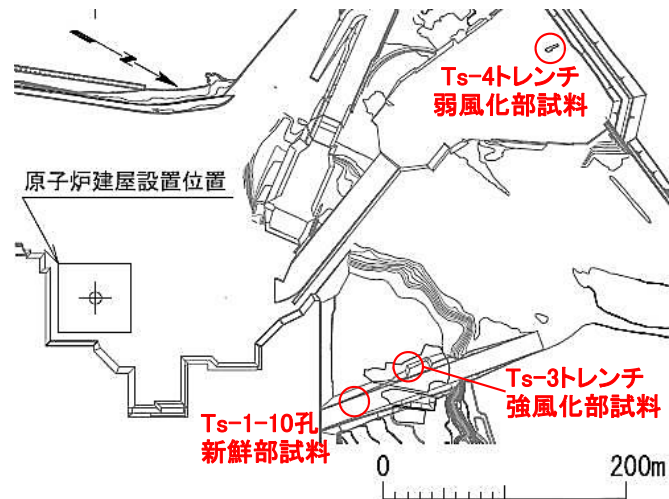
注) 試験・分析結果の詳細はP.8-14, 8-16, 8-17, P.8-27~P.8-31参照。

* スメクタイトとハロイサイトの構成比率は、MB吸着量・CECが主にスメクタイトに依存することから推定。

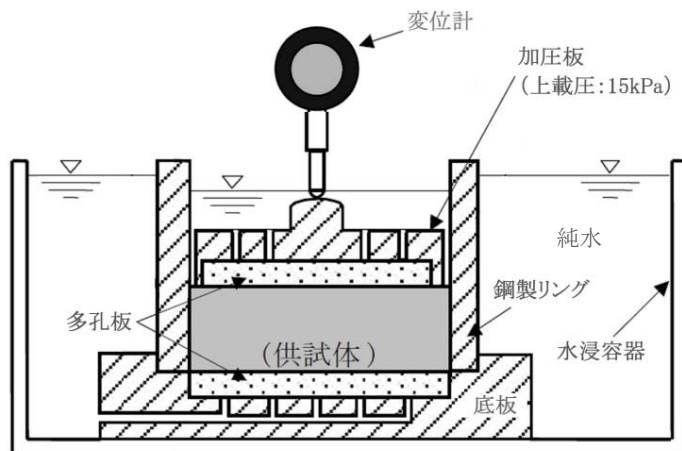
- 弱風化部では、XRDによるスメクタイトの回折線強度・MB吸着量・CECが増加し、ガラスのスメクタイトへの変質が進みスメクタイトが増加する。ガラスの一部は溶解してCa・Si・Na・Kが溶脱し、乾燥密度が低下し、間隙率は増大するが、軽石のガラスの骨格は保持されている。
- 強風化部ではXRDのハロイサイトの回折線強度が増加し、ハロイサイトの構造水によって強熱減量(LOI)が増加する。Caの溶脱が顕著となり、斜長石はほぼ溶解する。乾燥密度の低下と間隙率の増大が進行し、軽石のガラスの溶解も進行し、骨格は壊れ岩石はほとんど強度を失っている。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(13/15)

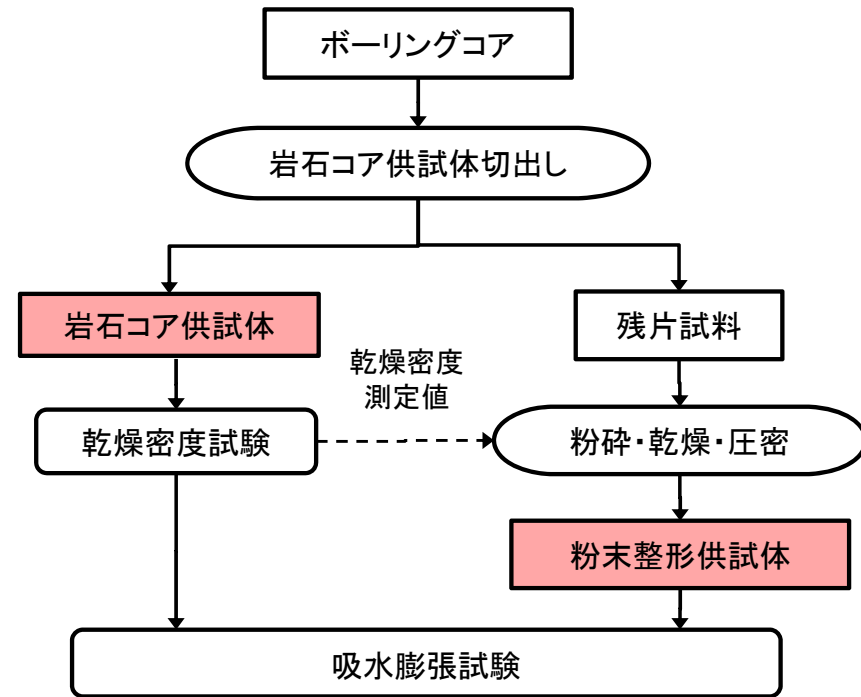
③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(6/7)：吸水膨張試験(1/2)：試験方法



試料採取位置図



吸水膨張試験装置



- ・乾燥は60°Cで24時間
- ・粉砕は100メッシュ(0.149mm)以下とした

供試体作成～試験実施フロー

淡灰色火山礫凝灰岩の新鮮部、弱風化部及び強風化部の吸水膨張特性の違いを把握するため、岩石コア供試体及び粉末整形供試体(岩石コアを粉末にした後に岩石コア供試体と同程度の乾燥密度に締固めた供試体)の吸水膨張試験を実施した。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(14/15)

③風化による岩石の物理特性・鉱物等の変化(7/7)：吸水膨張試験(2/2)：試験結果

吸水膨張試験結果

風化性状	岩石薄片・SEM観察・X線分析結果		試料採取位置	供試体	乾燥密度 g/cm ³	吸水膨張率* %	吸水膨張率 の変化		
	軽石のガラス	スメクタイト							
強風化部		骨格は壊れている	スメクタイト	風化によりスメクタイトが増加している	Ts-3トレンチ	岩石コア	0.87	5.7	③ ほぼ変化なし
					粉末整形	0.86	4.0		
弱風化部		骨格は保持されている	スメクタイト	風化によりスメクタイトが増加している	Ts-4トレンチ	岩石コア	1.25	0.33	② 顕著に増加
					粉末整形	1.22	12.0		
新鮮部		骨格は保持されている	スメクタイト	続成作用で形成されたスメクタイトが含まれている	Ts-1-10孔 深度3.25~3.63m	岩石コア	1.23	0.13	① 増加
					粉末整形	1.22	4.6		

* 吸水膨張率は変位量がほぼ安定した吸水開始7日後の値。

- 新鮮部及び弱風化部の岩石コア供試体は吸水膨張をほとんど生じないが、粉末整形供試体は吸水膨張を生じ、粉砕の有無による明瞭な差が認められる(①, ②)。一方、強風化部の供試体ではこのような差は認められない(③)。
- 風化による膨張率の違いは、岩石薄片、SEM観察及びX線分析の結果と合わせて以下のように説明され、淡灰色火山礫凝灰岩の強風化部の形成時に膨張が生じたことを示唆する。

【新鮮部・弱風化部】

岩石コア供試体ではガラスから成る岩石の骨格が強固で吸水膨張は生じないが、粉砕により骨格が壊されたため応力が解放され吸水膨張が生じたものと考えられる。

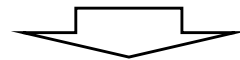
【強風化部】

風化により岩石の骨格が壊されて膨張が生じた後であるため、粉砕しても吸水膨張率は変化しないものと考えられる。

8.2.1 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討(15/15)

まとめ

- 風化に伴う岩盤の膨張に関する文献に基づく検討の結果, 強風化部の膨張は, 風化に伴って形成されたスメクタイトの吸水膨張及び岩石組織の破壊に伴う応力解放によるものである可能性がある。
- 大間地点の風化による岩石組織, 鉱物, 物理特性の変化等は, 淡灰色火山礫凝灰岩の強風化部の形成時に膨張が生じたことを示唆する。

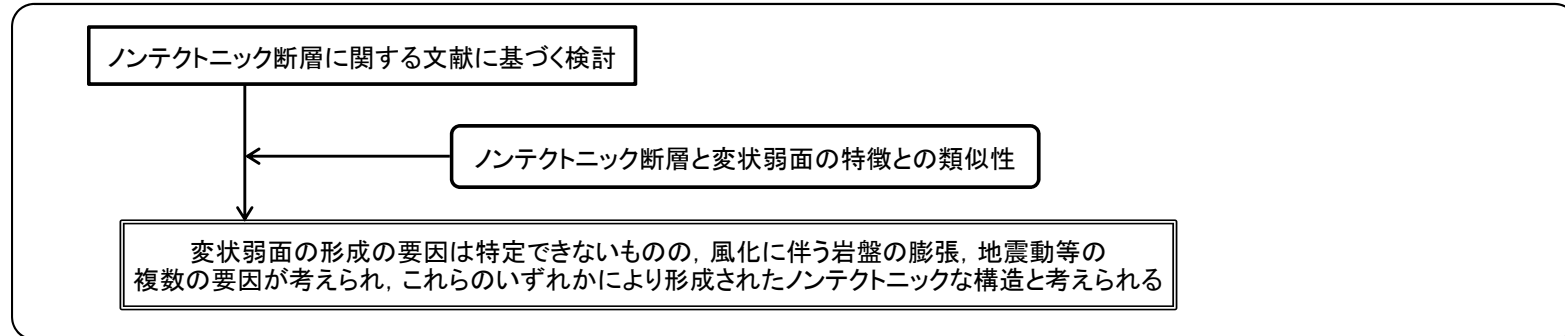


風化に伴う岩盤の膨張に関する検討結果は, 強風化部の膨張に矛盾しない。

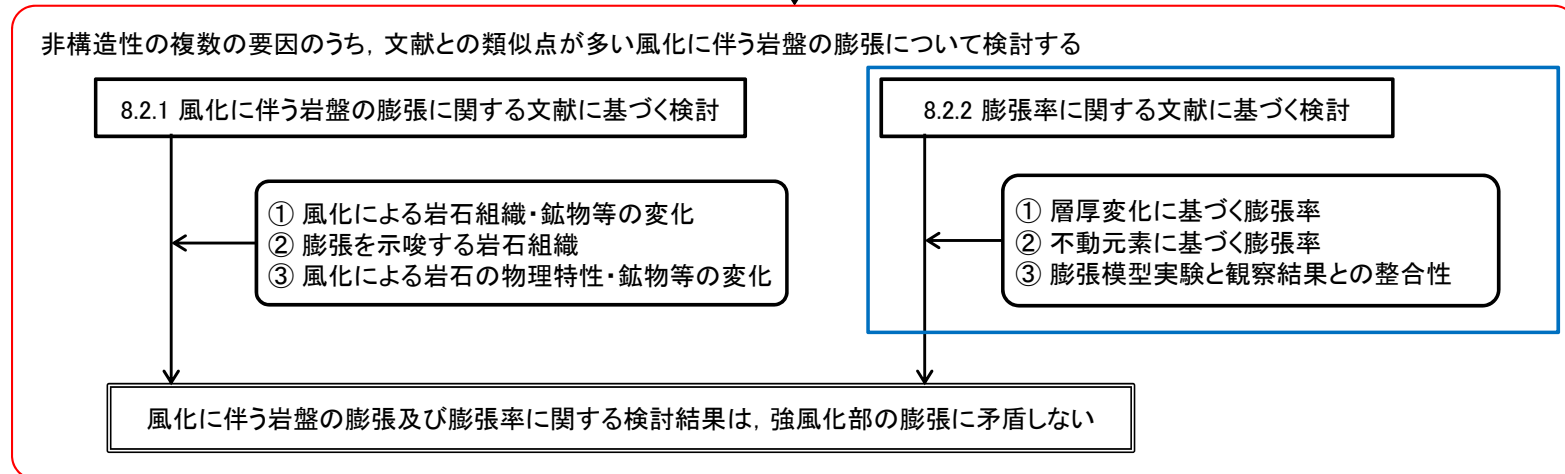
8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(1/17)

検討の流れ

8.1 ノンテクトニック断層との類似性に関する検討



8.2 風化に伴う岩盤の膨張に関する検討



変状弱面のノンテクトニックな形成要因のまとめ

- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、非構造的な複数の要因(風化に伴う岩盤の膨張、地震動等)によるものと考えられる。
- 強風化部の形成に伴う岩盤の膨張は分析・観察結果と矛盾しないが、地震動等の影響も否定できない。
- これら複数の要因は、少なくとも変状弱面が非構造的なもの判断されること(本編資料P.4-78参照)と矛盾しない。

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(2/17)

文献の記述と大間地点のデータに基づく検討結果

膨張率の評価手法	風化に伴う岩盤の膨張率に関する文献の記述	大間地点のデータに基づく膨張率の検討結果	参照頁
観察に基づく評価	<ul style="list-style-type: none"> 風化に伴う岩盤の膨張率を直接的に測定した研究例は少ない。Folk and Patton (1982)³⁰⁾は、花崗岩に貫入したペグマタイト脈の変形から、風化に伴って花崗岩の体積が50%膨張することを示した。 膨張性土壌については、13年間にわたり鉛直変位量の変動を測定した研究(Driscoll and Chown (2001)³¹⁾)があり、地表面で最大4cm程度、地中深度2mで数mm程度の降水量の変動に応じた季節変動が認められ、地中深度3mでほぼ変動は認められなくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 強風化部の厚さと地層の層厚の関係から求めた風化に伴う岩盤の鉛直方向の膨張率は約12%となった。 文献に示されたデータから含水比の変動に伴う鉛直方向の膨張率の変動を求めると、地表面で約1%(0.04m/3m)となり、上記の大間地点の膨張率(約12%)に比べて1オーダー小さく、含水比の変動による膨張への影響は小さいものと考えられる。 	P.8-24
不動元素に基づく評価	<ul style="list-style-type: none"> チタン等は、風化に伴う元素の移動がほとんど生じない不動元素とする文献は多く、不動元素の化学分析結果に基づいて、風化に伴う岩盤の膨張率を求めた研究例は千木良・中田(2013)³²⁾に示されている。 チタンは、酸性環境及び有機物の多い還元環境では不動ではないとする研究(Cornu et al. (1999)³³⁾, Du et al. (2012)³⁴⁾などもある。 	<ul style="list-style-type: none"> 大間地点の岩盤は、風化の際には厚さ1m以上の段丘堆積物によって覆われており、Cornuらが指摘する酸性環境、還元環境等のチタンが移動し易い風化環境にはなかったものと考えられる。 チタン等を不動元素として求めた鉛直方向の膨張率は約11%(Ts-1トレンチ)及び約14%(Ts-6法面)となった。 	P.8-25～ P.8-34
異なる手法、観察事実等の整合性		<ul style="list-style-type: none"> 上記のように異なる手法で求めた鉛直方向の膨張率は約11%～約14%で、ほぼ同じ値となった。 このような膨張率の値はトレンチで観察された変位量と整合的であることが確認された。 膨張模型実験の結果は、トレンチで観察された変状弱面の分布と整合的であった。 	P.8-24, 8-32, 8-33, P.8-35～ P.8-38

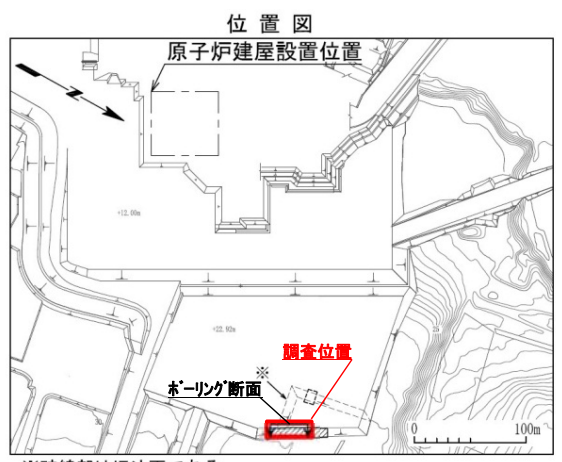
風化に伴う岩盤の膨張率に関する文献の記述と大間地点のデータに基づいて岩盤の膨張率について検討した。

- 大間地点の風化に伴う岩盤の膨張率を層厚変化及び不動元素に基づいて求めた結果、鉛直方向の膨張率は約11%～約14%でほぼ同じ値となった。
- これらの値は、トレンチで確認された変位量の観察結果及び模型実験の結果とも整合的であることが確認された。
- 以上のことから、大間地点の変状は風化に伴う岩盤の膨張による説明と矛盾しない。



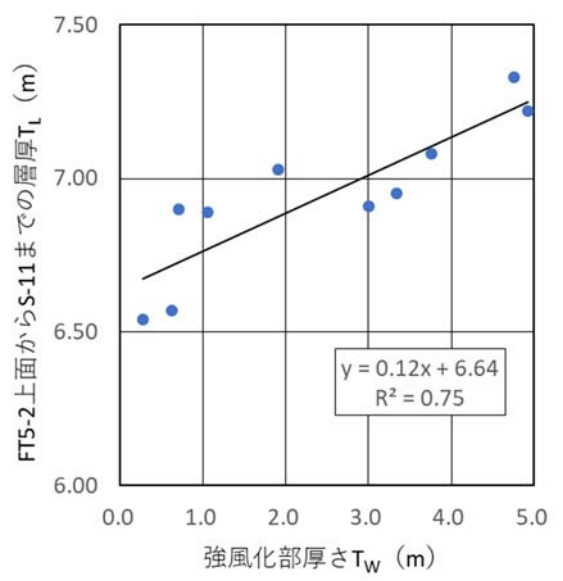
8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(3/17)

①層厚変化に基づく膨張率: Ts-6法面(強風化部)

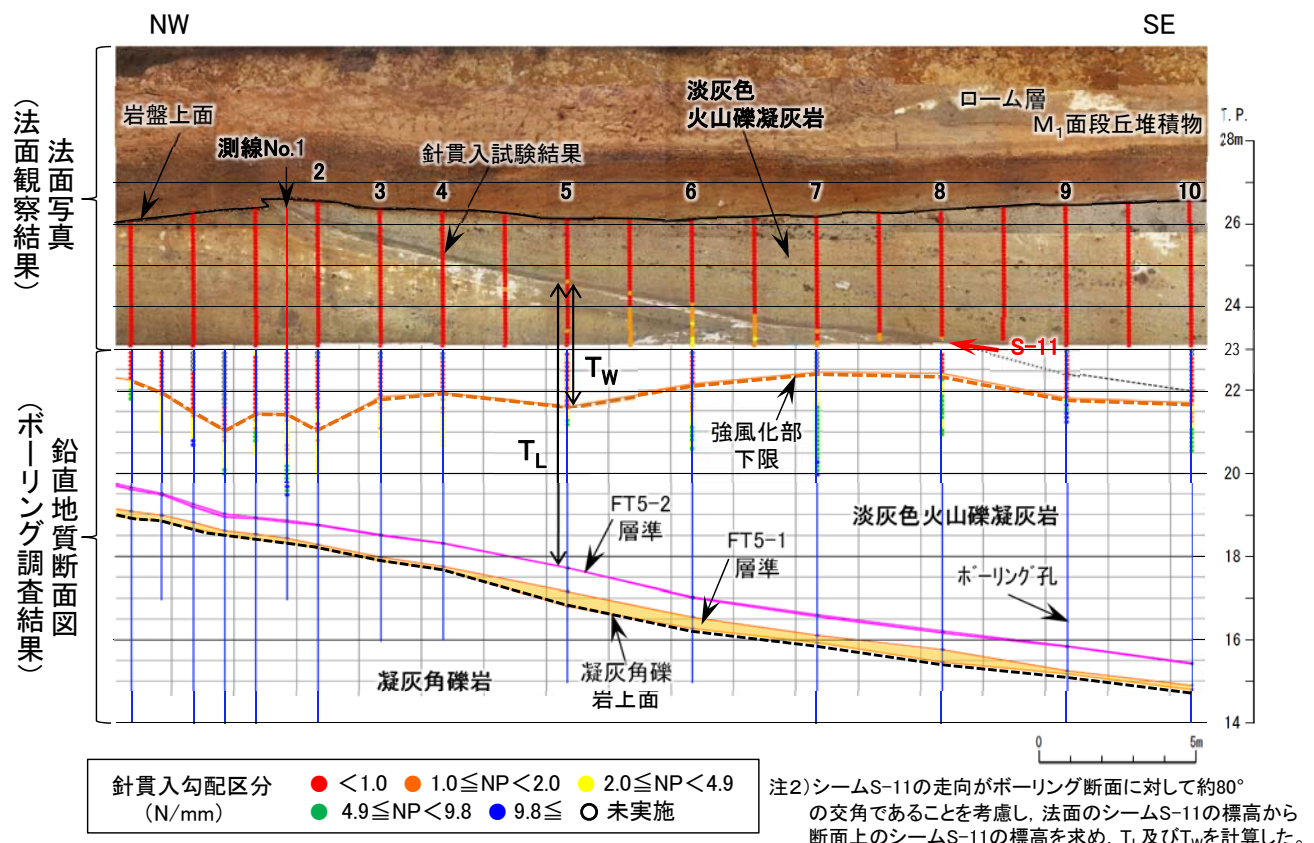


注1)ボーリング断面は法面に平行で末端部の約3m南西側に位置する。

測線 NO.	強風化部層厚 T_W (m)	FT5-2上面 ~ S-11層厚 T_L (m)
1	4.76	7.33
2	4.93	7.22
3	3.76	7.08
4	3.34	6.95
5	3.00	6.91
6	1.91	7.03
7	1.06	6.89
8	0.71	6.90
9	0.62	6.57
10	0.27	6.54



強風化部の厚さ(T_W)と地層の厚さ(T_L)の関係



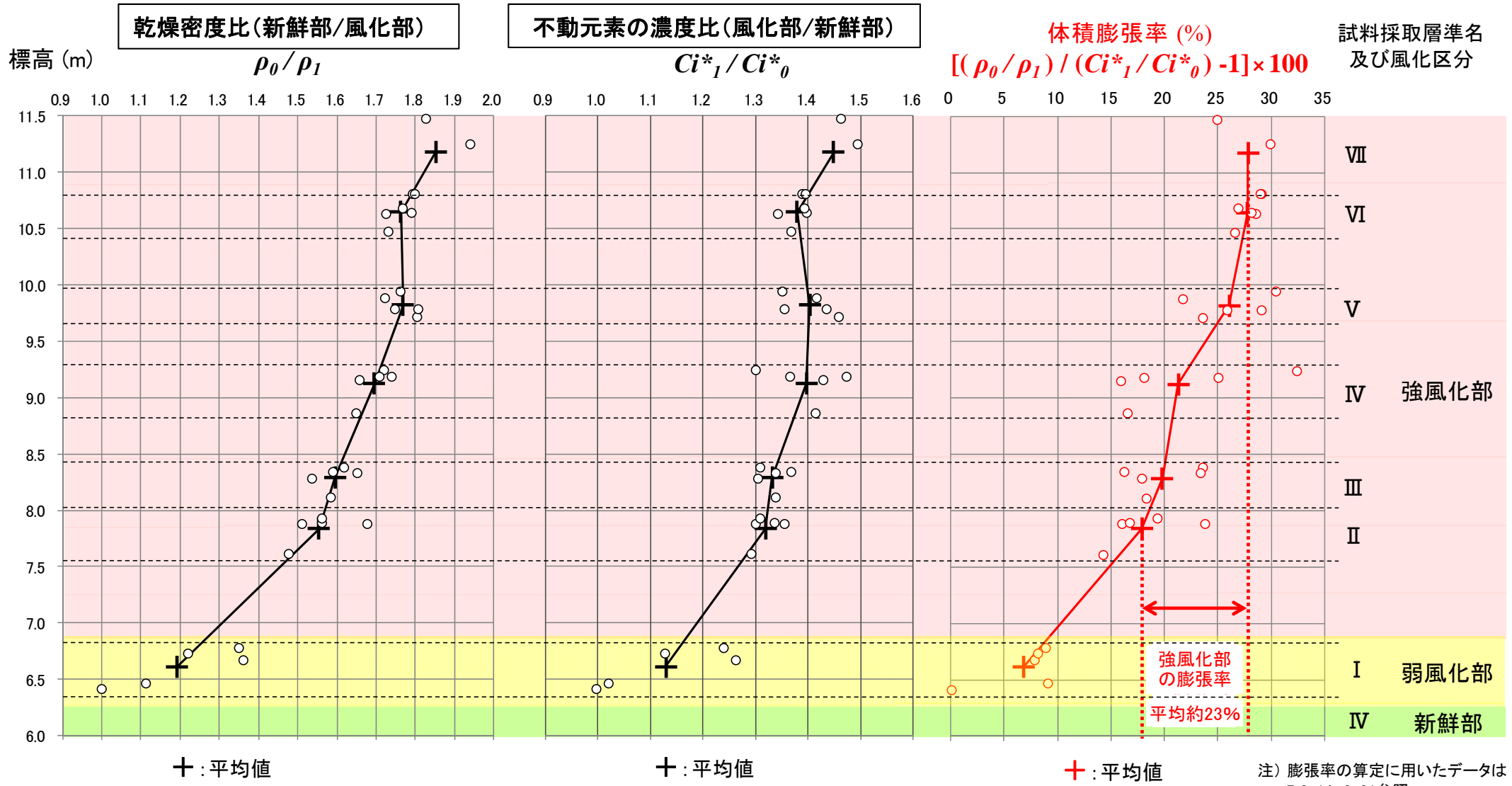
Ts-6法面の強風化部の厚さ(T_W)と地層の厚さ(T_L)

Ts-6法面及びボーリングのデータに基づいて、シームS-11下盤の強風化部の厚さ(T_W)とFT5-2層準からシームS-11までの淡灰色火山礫凝灰岩の厚さ(T_L)の関係を調べた。
 ・ T_W と T_L には正の相関が認められ、近似直線の勾配約12%は強風化部の鉛直方向の膨張率を示す。



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(4/17)

②不動元素に基づく膨張率(1/10): 体積膨張率の算定結果[Ts-1トレンチ]



強風化部の膨張率
平均約23%

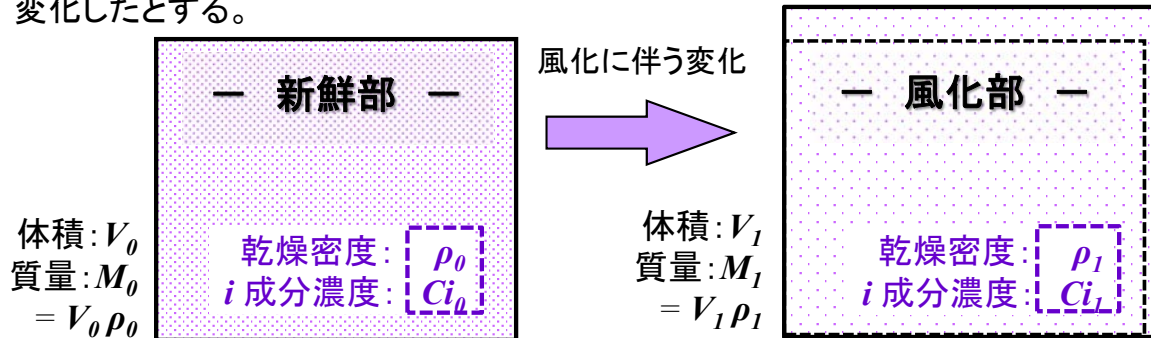
注) 膨張率の算定に用いたデータは P.8-14, 8-31参照。

- 乾燥密度比 (ρ_0/ρ_1) と不動元素 Ti, Al, Feの濃度比 (Ci^*_1/Ci^*_0) の平均値から体積膨張率を算定した。
- 深部から浅部への風化の進行に伴い体積膨張率は増大する。
- 強風化部の体積膨張率は平均約23% (約18%~約28%)を示す。

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(6/17)

②不動元素に基づく体積膨張率(3/10): 風化の進行と不動元素の濃度

風化に伴って岩石の体積, 乾燥密度, 化学成分の濃度が下図に示すように変化したとする。



風化前後の付加や溶脱の生じていない不動元素 i^* の総量は等しいため, 次式が成り立つ (Grant (1986)³⁵⁾)。

$$M_0 Ci_0^* = M_1 Ci_1^*$$

2種の不動元素 a, b が存在する場合には,

$$M_0 Ca_0^* = M_1 Ca_1^*$$

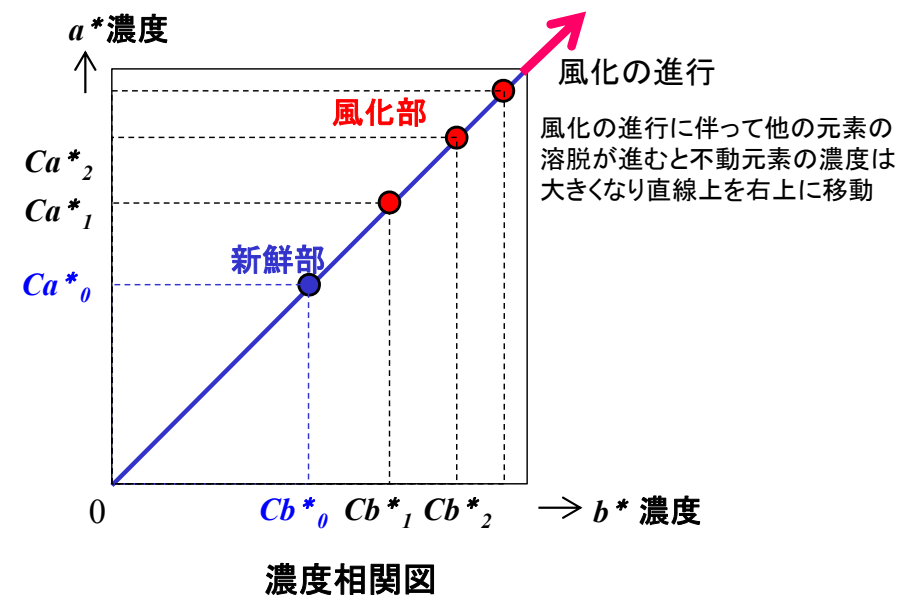
$$M_0 Cb_0^* = M_1 Cb_1^*$$

したがって,

$$\frac{Ca_1^*}{Ca_0^*} = \frac{Cb_1^*}{Cb_0^*} \left(= \frac{M_0}{M_1} \right) \quad \dots\dots ①$$

$$①式を变形すると \quad Ca_1^* = \frac{Ca_0^*}{Cb_0^*} \cdot Cb_1^* \quad \dots\dots ②$$

横軸に b^* の濃度, 縦軸に a^* の濃度をとって2元素間の濃度相関図を作成すると, 右図に示すように, 不動元素の風化部のプロットは新鮮部のプロットと原点を通る直線上に分布する。



- 新鮮部及び風化部の濃度分析値に基づいて2元素間の濃度相関図を作成する。
- 2元素とも不動元素の場合には, 風化の進行に伴って新鮮部における濃度比を保ったまま濃度が増大し, 相関図は原点を通る直線上の分布となる。

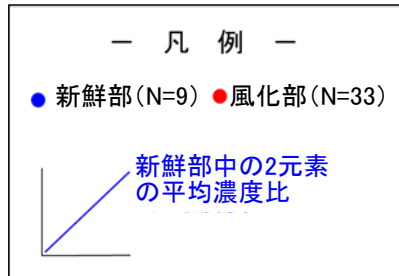


8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(7/17)

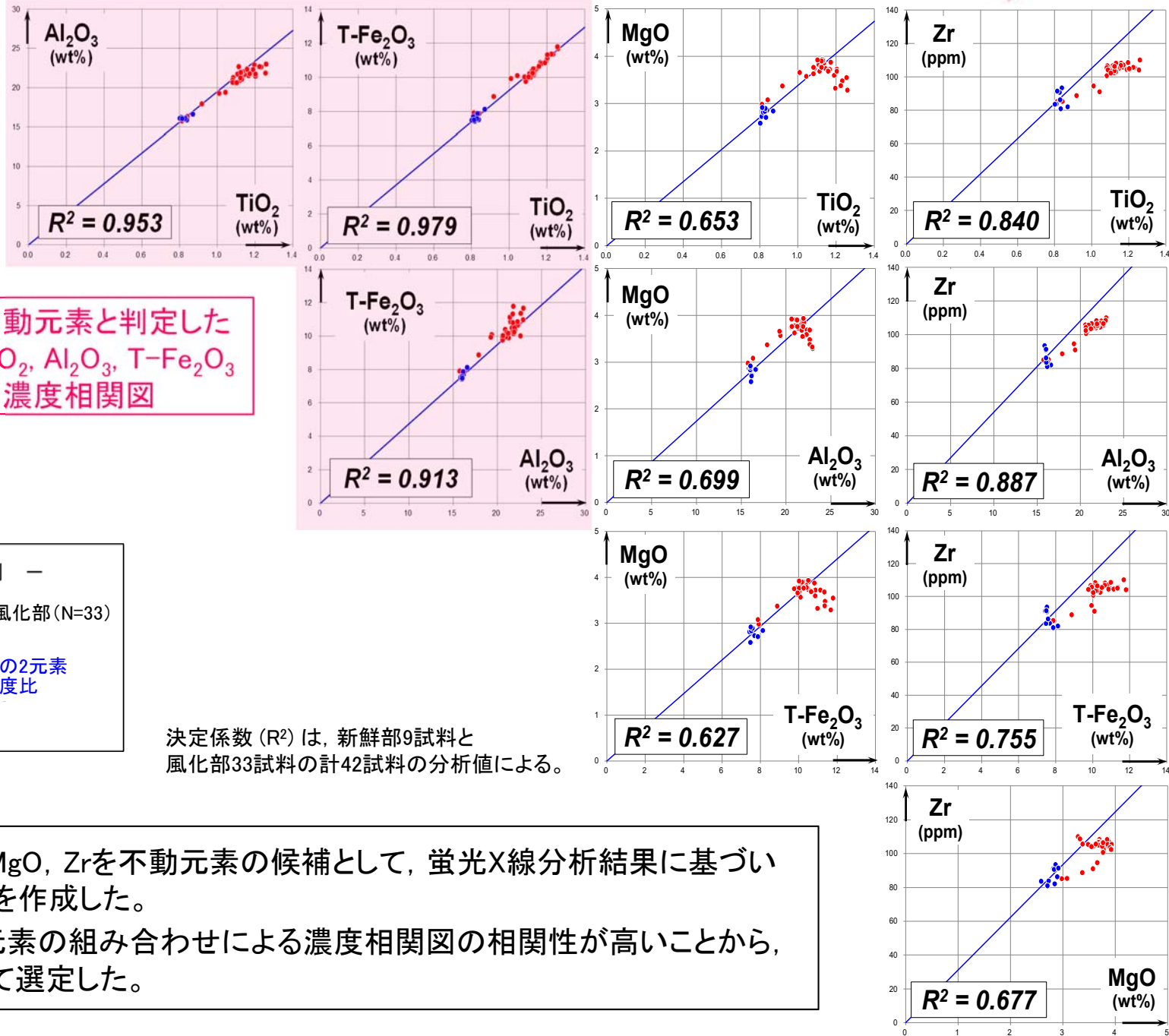
②不動元素に基づく体積膨張率(4/10): 不動元素の選定 (Ts-1トレンチ付近)

注) 全岩化学分析結果はP.8-30参照。

不動元素と判定した
TiO₂, Al₂O₃, T-Fe₂O₃
の濃度相関図



決定係数 (R²) は、新鮮部9試料と風化部33試料の計42試料の分析値による。

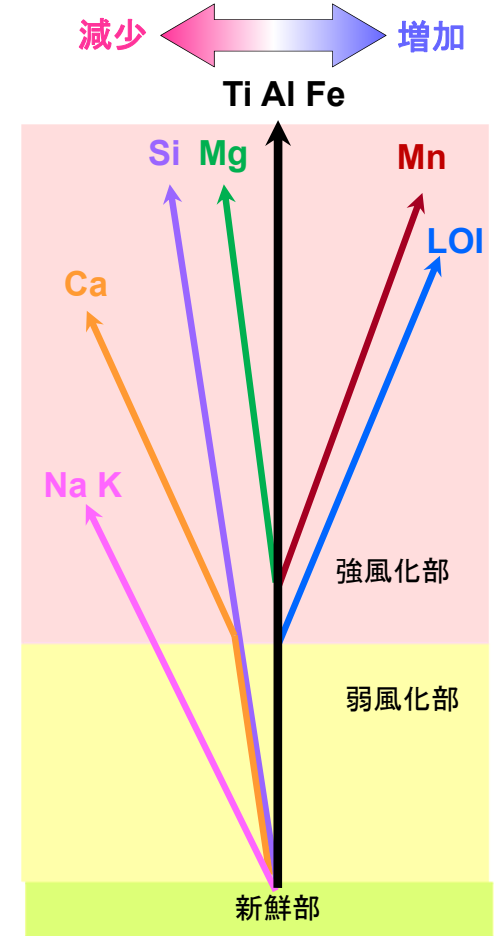
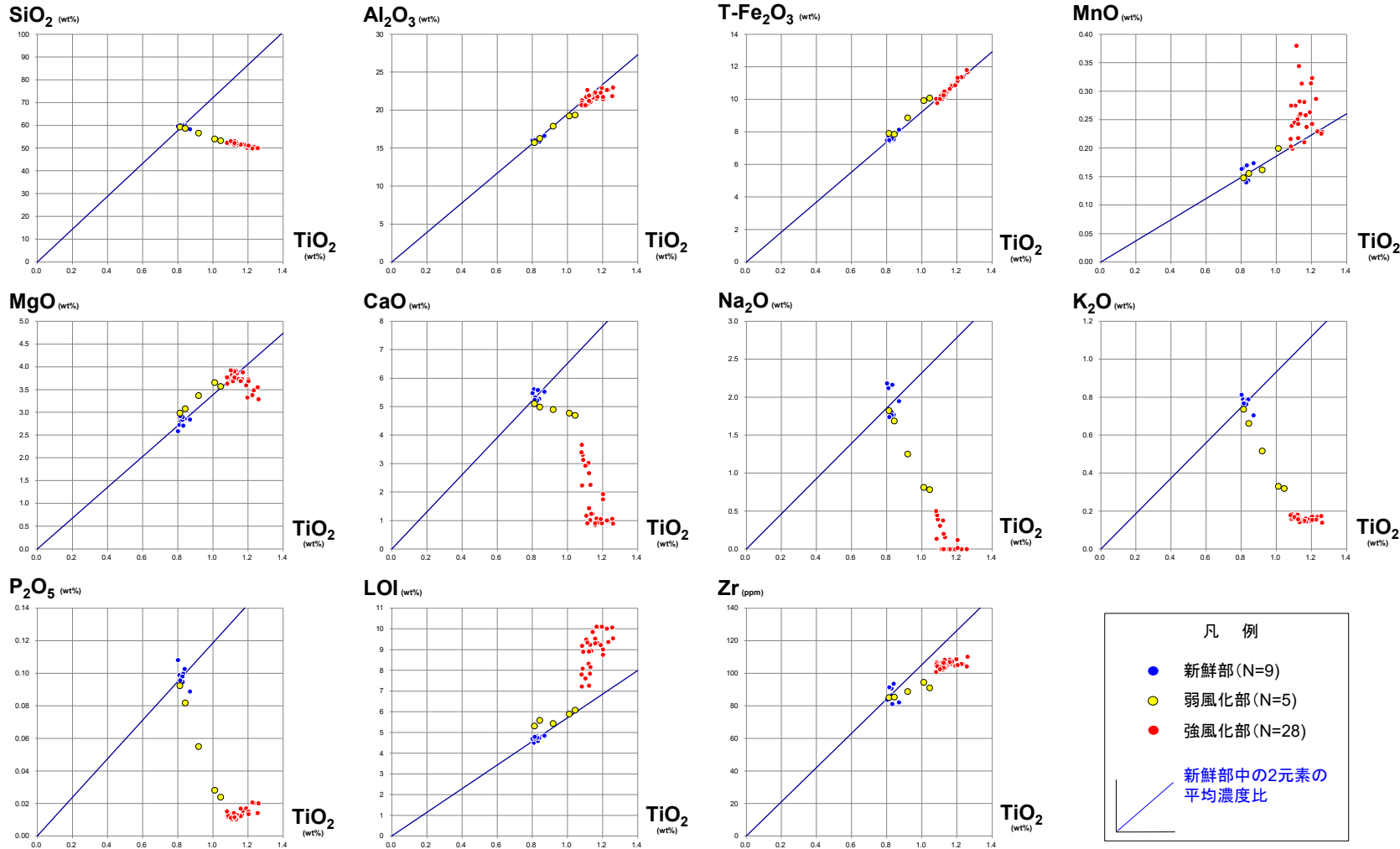


- TiO₂, Al₂O₃, T-Fe₂O₃, MgO, Zrを不動元素の候補として、蛍光X線分析結果に基づいて2元素間の濃度相関図を作成した。
- TiO₂, Al₂O₃, T-Fe₂O₃の3元素の組み合わせによる濃度相関図の相関性が高いことから、Ti, Al, Fe を不動元素として選定した。



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(8/17)

② 不動元素に基づく体積膨張率(5/10): 風化による化学組成の変化(Ts-1トレンチ付近)



風化に伴うTi, Al, Feの濃度変化に対する他の元素の相対的濃度変化

- 不動元素(Ti)に対する濃度相関図を作成して風化による岩石の化学組成の変化について整理した。
- 弱風化部では、新鮮部に対してMg, Mn, LOI(強熱減量)の増減がほとんどなく、SiとCa, NaとKがそれぞれほぼ同じ比率で減少する。
- 強風化部では、弱風化部と同様の元素の減少に加えてMgの減少も発生し、特にCaは減少が加速する。一方、Mn及びLOIは増加が認められる。



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(9/17)

②不動元素に基づく体積膨張率(6/10):全岩化学分析結果一覧表(Ts-1トレンチ付近)

風化区分	試料深度・標高							XRF分析結果一覧表 (LO加えた重量合計を100%として標準化) ND: 定量限界以下													XRF分析結果一覧表 (標準化前) ND: 定量限界以下														
	ボーリング孔名/ ブロック試料名	採取深度	層準	平均	孔口	試料	層準別	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Zr	total	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Zr	total		
				深度	標高	標高																												平均標高	wt%
強風化部	Ts-1-22	1.20	-	1.30	VII	1.25	12.06	10.81	11.18	51.12	1.17	21.50	10.86	0.26	3.72	1.07	ND	0.16	0.01	10.11	106	100.00	54.34	1.24	22.86	11.55	0.27	3.96	1.14	ND	0.17	0.01	10.74	113	106.30
	Ts-1-25	0.57	-	0.65		0.61	12.08	11.47		50.51	1.23	22.63	11.36	0.23	3.48	0.99	ND	0.17	0.02	9.36	105	100.00	53.45	1.30	23.95	12.02	0.24	3.68	1.05	ND	0.18	0.02	9.91	112	105.82
	Ts-1-26	0.75	-	0.81		0.78	12.03	11.25		49.98	1.26	22.98	11.67	0.23	3.29	0.89	ND	0.14	0.02	9.54	110	100.00	52.98	1.34	24.35	12.37	0.24	3.48	0.94	ND	0.15	0.02	10.11	117	106.00
	Ts-1-22	1.55	-	1.63	VI	1.59	12.06	10.47	10.65	51.40	1.14	21.66	10.49	0.31	3.73	1.24	ND	0.15	0.01	9.84	105	100.00	54.15	1.21	22.82	11.05	0.33	3.93	1.30	ND	0.16	0.01	10.37	111	105.35
	Ts-1-23	1.35	-	1.45		1.40	12.03	10.63		52.02	1.11	21.73	10.21	0.27	3.82	1.17	ND	0.16	0.01	9.49	105	100.00	54.86	1.17	22.92	10.77	0.29	4.03	1.23	ND	0.17	0.01	10.01	111	105.46
	Ts-1-24	1.35	-	1.45		1.40	12.04	10.64		51.33	1.16	22.40	10.66	0.21	3.70	0.85	ND	0.14	0.01	9.52	108	100.00	53.77	1.21	23.47	11.17	0.22	3.87	0.89	ND	0.15	0.01	9.97	113	104.75
	Ts-1-25	1.22	-	1.32	V	1.27	12.08	10.81	9.82	51.72	1.17	21.77	10.81	0.24	3.88	0.92	ND	0.15	0.02	9.31	107	100.00	54.47	1.23	22.93	11.39	0.25	4.08	0.97	ND	0.15	0.02	9.81	113	105.32
	Ts-1-26	1.30	-	1.40		1.35	12.03	10.68		51.53	1.16	22.32	10.64	0.28	3.69	0.90	ND	0.15	0.02	9.30	107	100.00	54.40	1.22	23.56	11.23	0.30	3.89	0.95	ND	0.16	0.02	9.82	113	105.56
	Ts-1-22	2.30	-	2.40		2.35	12.06	9.71		49.89	1.22	22.66	11.36	0.29	3.38	1.00	ND	0.16	0.02	10.01	106	100.00	53.09	1.30	24.12	12.09	0.30	3.59	1.07	ND	0.17	0.02	10.66	112	106.43
	Ts-1-23	2.20	-	2.30	IV	2.25	12.03	9.78	9.82	50.09	1.20	22.92	10.97	0.31	3.33	0.90	ND	0.15	0.01	10.10	109	100.00	53.17	1.27	24.33	11.64	0.33	3.53	0.96	ND	0.16	0.02	10.73	115	106.15
	Ts-1-24	2.05	-	2.15		2.10	12.04	9.94		52.35	1.13	21.84	10.14	0.26	3.84	1.01	ND	0.16	0.01	9.23	108	100.00	54.92	1.19	22.91	10.64	0.27	4.03	1.06	ND	0.17	0.01	9.69	114	104.91
	Ts-1-25	2.15	-	2.25		2.20	12.08	9.88		51.34	1.19	22.29	10.86	0.26	3.59	1.06	ND	0.16	0.02	9.22	104	100.00	54.19	1.26	23.53	11.46	0.28	3.79	1.11	ND	0.17	0.02	9.73	110	105.55
	Ts-1-26	2.20	-	2.30	2.25	12.03	9.78	51.72	1.11	22.65	10.01	0.38	3.69	0.91	ND	0.16	0.01	9.34	107	100.00	54.46	1.17	23.85	10.54	0.40	3.88	0.96	ND	0.17	0.01	9.84	112	105.30		
	Ts-1-22	3.15	-	3.25	III	3.20	12.06	8.86	9.12	50.93	1.20	21.44	11.13	0.32	3.72	1.93	0.12	0.17	0.01	9.01	104	100.00	53.72	1.27	22.61	11.74	0.34	3.92	2.04	0.13	0.18	0.02	9.50	110	105.48
	Ts-1-23	2.80	-	2.90		2.85	12.03	9.18		50.03	1.26	21.83	11.79	0.23	3.55	1.06	ND	0.17	0.01	10.06	104	100.00	52.81	1.33	23.05	12.45	0.24	3.74	1.12	ND	0.18	0.01	10.63	110	105.57
	Ts-1-24	2.75	-	2.85		2.80	12.04	9.24		51.86	1.09	20.57	9.94	0.20	3.74	3.13	0.39	0.16	0.01	8.90	106	100.00	54.61	1.15	21.67	10.47	0.21	3.94	3.30	0.41	0.17	0.01	9.37	112	105.31
	Ts-1-25	2.88	-	2.98	II	2.93	12.08	9.15	8.29	51.13	1.20	21.74	11.33	0.24	3.68	1.74	0.01	0.15	0.01	8.75	105	100.00	53.41	1.26	22.71	11.83	0.25	3.85	1.82	0.01	0.16	0.01	9.14	110	104.46
	Ts-1-26	2.80	-	2.90		2.85	12.03	9.18		52.03	1.14	22.00	10.38	0.26	3.85	1.24	ND	0.15	0.01	8.93	105	100.00	54.63	1.19	23.11	10.90	0.27	4.05	1.30	ND	0.15	0.01	9.38	111	105.00
	Ts-1-22	3.90	-	4.00		3.95	12.06	8.11		51.64	1.12	20.90	10.40	0.25	3.78	3.02	0.37	0.18	0.01	8.31	102	100.00	53.88	1.17	21.81	10.85	0.26	3.94	3.15	0.39	0.19	0.01	8.67	107	104.35
	Ts-1-23	3.60	-	3.70	I	3.65	12.03	8.38	7.84	51.98	1.08	21.28	9.89	0.27	3.76	2.24	0.13	0.16	0.01	9.18	107	100.00	54.34	1.13	22.25	10.35	0.29	3.93	2.34	0.14	0.17	0.01	9.59	111	104.55
Ts-1-24	3.65	-	3.75	3.70		12.04	8.34	52.73		1.13	21.94	10.49	0.34	3.93	1.44	ND	0.14	0.01	7.83	105	100.00	54.74	1.17	22.77	10.89	0.36	4.08	1.49	ND	0.15	0.01	8.13	109	103.80	
Ts-1-25	3.70	-	3.80	3.75		12.08	8.33	52.64		1.13	21.08	10.23	0.28	3.91	2.25	0.16	0.14	0.01	8.16	103	100.00	54.79	1.18	21.94	10.65	0.29	4.07	2.35	0.16	0.15	0.01	8.49	108	104.09	
Ts-1-26	3.70	-	3.80	3.75	12.03	8.28	52.65	1.08	20.96	9.95	0.20	3.63	3.66	0.46	0.17	0.01	7.21	106	100.00	54.41	1.12	21.66	10.28	0.21	3.75	3.78	0.48	0.18	0.02	7.45	109	103.34			
Ts-1-22	4.40	-	4.50	I	4.45	12.06	7.61	6.61	52.52	1.09	20.61	9.76	0.24	3.75	3.31	0.45	0.18	0.01	8.08	104	100.00	55.03	1.14	21.60	10.23	0.25	3.93	3.46	0.47	0.19	0.01	8.46	109	104.79	
Ts-1-23	4.10	-	4.20		4.15	12.03	7.88		52.37	1.08	20.66	10.02	0.22	3.77	3.39	0.50	0.18	0.02	7.79	101	100.00	54.45	1.12	21.48	10.42	0.22	3.92	3.53	0.52	0.19	0.02	8.10	105	103.99	
Ts-1-24	4.10	-	4.20		4.15	12.04	7.89		53.05	1.12	21.23	10.17	0.22	3.90	2.66	0.20	0.16	0.01	7.26	104	100.00	54.84	1.16	21.95	10.51	0.22	4.03	2.75	0.21	0.17	0.01	7.51	107	103.37	
Ts-1-25	4.10	-	4.20	4.15	12.08	7.93	53.05	1.10	20.63	10.02	0.25	3.92	2.93	0.31	0.17	0.01	7.61	102	100.00	55.12	1.15	21.43	10.41	0.25	4.07	3.04	0.32	0.17	0.01	7.91	106	103.90			
Ts-1-26	4.10	-	4.20	4.15	12.03	7.88	52.19	1.12	21.92	10.25	0.24	3.76	1.43	ND	0.16	0.01	8.90	106	100.00	54.96	1.18	23.08	10.79	0.26	3.96	1.51	ND	0.17	0.01	9.38	112	105.31			
弱風化部	Ts-1-22	5.60	-	5.70	I	5.65	12.06	6.41	6.61	59.32	0.81	15.74	7.91	0.15	2.98	5.11	1.82	0.74	0.09	5.31	85	100.00	60.33	0.83	16.01	8.04	0.15	3.03	5.20	1.85	0.75	0.09	5.40	87	101.69
	Ts-1-23	5.53	-	5.60		5.57	12.03	6.47		58.72	0.84	16.31	7.87	0.16	3.08	4.99	1.69	0.66	0.08	5.58	85	100.00	59.98	0.86	16.66	8.04	0.16	3.15	5.10	1.73	0.68	0.08	5.70	87	102.14
	Ts-1-24	5.32	-	5.42		5.37	12.04	6.67		53.31	1.04	19.38	10.09	0.69	3.57	4.70	0.78	0.32	0.02	6.09	91	100.00	54.17	1.06	19.70	10.25	0.70	3.63	4.77	0.80	0.32	0.02	6.18	93	101.62
	Ts-1-25	5.25	-	5.35		5.30	12.08	6.78		54.08	1.01	19.27	9.93	0.20	3.66	4.77	0.81	0.33	0.03	5.90	95	100.00	54.98	1.03	19.59	10.10	0.20	3.72	4.85	0.83	0.34	0.03	6.00	96	101.67
	Ts-1-26	5.25	-	5.35		5.30	12.03	6.73		56.61	0.92	17.90	8																						



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(10/17)

②不動元素に基づく体積膨張率(7/10):体積膨張率算定結果一覧表(Ts-1トレンチ付近)

風化区分	試料深度・標高							密度試験関連データ					XRF分析関連データ							体積膨張率算定値						
	ボリック孔名/ ブロック試料名	採取深度	層準	平均深度	孔口標高	試料標高	層準別平均標高	湿潤密度 ρt	含水比 w	乾燥密度 ρd(=ρ1)	試料別乾燥密度比	層準別乾燥密度平均	層準別乾燥密度比	TiO2 濃度 C1a	TiO2 試料別濃度比	Fe2O3 濃度 C1b	Fe2O3 試料別濃度比	Al2O3 濃度 C1c	Al2O3 試料別濃度比	試料別不動元素濃度比 3元素平均	層準別不動元素濃度比 3元素平均	試料別 ((ρ0/ρ1) ÷ (C1/C0)-1) × 100 (%)	層準別 ((ρ0/ρ1) ÷ (C1/C0)-1) × 100 (%)	II-VII 層準 強風化部 平均 (%)		
				m	m	m	m	g/cm³	%	g/cm³	ρ0/ρ1	g/cm³	ρ0/ρ1	wt%	C1a/C0a	wt%	C1b/C0b	wt%	C1c/C0c	C1/C0*	C1/C0*					
強風化部	Ts-1-22	1.20	-	1.30	VII	1.25	12.06	10.81	11.18	1.374	89.1	0.727	1.793	0.704	1.851	1.17	1.41	10.86	1.42	21.50	1.34	1.39	1.45	29.1	28.0	23.3
	Ts-1-25	0.57	-	0.65		0.61	12.08	11.47		1.341	87.9	0.714	1.826			1.23	1.49	11.36	1.49	22.63	1.41	1.46		25.0		
	Ts-1-26	0.75	-	0.81		0.78	12.03	11.25		1.326	97.4	0.672	1.940			1.26	1.52	11.67	1.53	22.98	1.43	1.49		29.9		
	Ts-1-22	1.55	-	1.63	VI	1.59	12.06	10.47	10.65	1.410	87.4	0.753	1.732	0.739	1.763	1.14	1.38	10.49	1.37	21.66	1.35	1.37	1.38	26.6	27.8	
	Ts-1-23	1.35	-	1.45		1.40	12.03	10.63		1.415	87.5	0.755	1.727			1.11	1.34	10.21	1.34	21.73	1.35	1.34		28.6		
	Ts-1-24	1.35	-	1.45		1.40	12.04	10.64		1.364	87.3	0.728	1.789			1.16	1.40	10.66	1.40	22.40	1.39	1.40		28.1		
	Ts-1-25	1.22	-	1.32	V	1.27	12.08	10.81	9.82	1.372	89.4	0.724	1.799	0.737	1.769	1.17	1.42	10.81	1.42	21.77	1.35	1.40	1.40	29.0	26.2	
	Ts-1-26	1.30	-	1.40		1.35	12.03	10.68		1.353	83.6	0.737	1.769			1.16	1.40	10.64	1.39	22.32	1.39	1.39		26.9		
	Ts-1-22	2.30	-	2.40		2.35	12.06	9.71		1.296	79.4	0.722	1.804			1.22	1.48	11.36	1.49	22.66	1.41	1.46		23.6		
	Ts-1-23	2.20	-	2.30	IV	2.25	12.03	9.78	9.12	1.351	87.4	0.721	1.808	0.769	1.695	1.20	1.45	10.97	1.44	22.92	1.42	1.44	1.40	25.9	21.6	
	Ts-1-24	2.05	-	2.15		2.10	12.04	9.94		1.378	86.4	0.739	1.763			1.13	1.37	10.14	1.33	21.84	1.36	1.35		30.5		
	Ts-1-25	2.15	-	2.25		2.20	12.08	9.88		1.400	85.1	0.756	1.723			1.19	1.44	10.86	1.42	22.29	1.38	1.42		21.7		
	Ts-1-26	2.20	-	2.30	III	2.25	12.03	9.78	8.29	1.376	84.7	0.745	1.749	0.817	1.595	1.11	1.35	10.01	1.31	22.65	1.41	1.36	1.33	29.1	19.9	
	Ts-1-22	3.15	-	3.25		3.20	12.06	8.86		1.455	84.2	0.790	1.650			1.20	1.46	11.13	1.46	21.44	1.33	1.41		16.6		
	Ts-1-23	2.80	-	2.90		2.85	12.03	9.18		1.385	84.9	0.749	1.739			1.26	1.52	11.79	1.54	21.83	1.36	1.47		18.1		
	Ts-1-24	2.75	-	2.85	II	2.80	12.04	9.24	7.84	1.423	88.0	0.757	1.721	0.838	1.554	1.09	1.32	9.94	1.30	20.57	1.28	1.30	1.32	32.4	18.1	
	Ts-1-25	2.88	-	2.98		2.93	12.08	9.15		1.420	80.6	0.786	1.657			1.20	1.45	11.33	1.48	21.74	1.35	1.43		15.9		
	Ts-1-26	2.80	-	2.90		2.85	12.03	9.18		1.409	84.8	0.763	1.709			1.14	1.37	10.38	1.36	22.00	1.37	1.37		25.0		
	Ts-1-22	3.90	-	4.00	I	3.95	12.06	8.11	6.61	1.478	79.6	0.823	1.584	1.093	1.192	1.12	1.36	10.40	1.36	20.90	1.30	1.34	1.13	18.3	6.8	
	Ts-1-23	3.60	-	3.70		3.65	12.03	8.38		1.450	80.2	0.805	1.619			1.08	1.31	9.89	1.30	21.28	1.32	1.31		23.6		
	Ts-1-24	3.65	-	3.75		3.70	12.04	8.34		1.485	81.1	0.820	1.589			1.13	1.36	10.49	1.37	21.94	1.36	1.37		16.3		
	Ts-1-25	3.70	-	3.80	I	3.75	12.08	8.33	7.84	1.453	84.3	0.789	1.652	0.838	1.554	1.13	1.37	10.23	1.34	21.08	1.31	1.34	1.32	23.4	18.1	
	Ts-1-26	3.70	-	3.80		3.75	12.03	8.28		1.526	80.1	0.847	1.538			1.08	1.31	9.95	1.30	20.96	1.30	1.30		17.9		
	Ts-1-22	4.40	-	4.50		4.45	12.06	7.61		1.552	75.8	0.883	1.476			1.09	1.32	9.76	1.28	20.61	1.28	1.29		14.3		
Ts-1-23	4.10	-	4.20	I	4.15	12.03	7.88	6.61	1.524	76.6	0.863	1.510	1.093	1.192	1.08	1.31	10.02	1.31	20.66	1.28	1.30	1.13	16.1	6.8		
Ts-1-24	4.10	-	4.20		4.15	12.04	7.89		1.511	80.9	0.835	1.560			1.12	1.36	10.17	1.33	21.23	1.32	1.34		16.8			
Ts-1-25	4.10	-	4.20		4.15	12.08	7.93		1.514	81.6	0.834	1.563			1.10	1.33	10.02	1.31	20.63	1.28	1.31		19.4			
Ts-1-26	4.10	-	4.20	I	4.15	12.03	7.88	6.61	1.420	82.8	0.777	1.677	1.093	1.192	1.12	1.36	10.25	1.34	21.92	1.36	1.35	1.13	23.8	6.8		
Ts-1-22	5.60	-	5.70		5.65	12.06	6.41		1.782	36.7	1.304	0.999			0.81	0.98	7.91	1.04	15.74	0.98	1.00		0.1			
Ts-1-23	5.53	-	5.60		5.57	12.03	6.47		1.696	44.9	1.170	1.114			0.84	1.02	7.87	1.03	16.31	1.01	1.02		9.1			
Ts-1-24	5.32	-	5.42	I	5.37	12.04	6.67	6.61	1.594	66.5	0.957	1.361	1.093	1.192	1.04	1.26	10.09	1.32	19.38	1.20	1.26	1.13	7.8	-		
Ts-1-25	5.25	-	5.35		5.30	12.08	6.78		1.603	66.1	0.965	1.350			1.01	1.22	9.93	1.30	19.27	1.20	1.24		8.9			
Ts-1-26	5.25	-	5.35		5.30	12.03	6.73		1.660	55.4	1.068	1.220			0.92	1.11	8.87	1.16	17.90	1.11	1.13		8.2			
新鮮部	Ts-1-7	1.10	-	1.20	IV	1.15	10.74	9.59	-	1.668	32.1	1.263	-	-	0.87	-	8.12	-	16.59	-	16.18	-	-	-	-	
	Ts-1-8	2.00	-	2.05		2.03	10.89	8.87		1.743	29.2	1.349			0.81		7.69		16.15							
	Ts-1-9	2.30	-	2.40		2.35	11.04	8.69		1.651	25.9	1.311			0.83		7.87		16.15							
	Ts-1-10	2.74	-	2.79		2.77	11.20	8.44		1.689	28.9	1.310			0.80		7.48		16.07							
	B01	(トレンチTs-1から 採取された ブロック試料)	-	-		8.8~9.0 m付近	-	1.712		31.9	1.298	0.82			7.43		16.02									
	B02				1.725			31.4	1.313	0.84	7.52	15.86														
	B03				1.696			31.4	1.291	0.83	7.53	16.00														
	B04				1.692			31.3	1.289	0.83	7.58	16.01														
	B07				1.715			31.4	1.305	0.81	7.49	16.03														
	新鮮部乾燥密度平均 (ρ0)										1.303	新鮮部不動元素濃度平均										0.83	C0a	7.63	C0b	16.10

*: C0=(C0a+C0b+C0c)/3

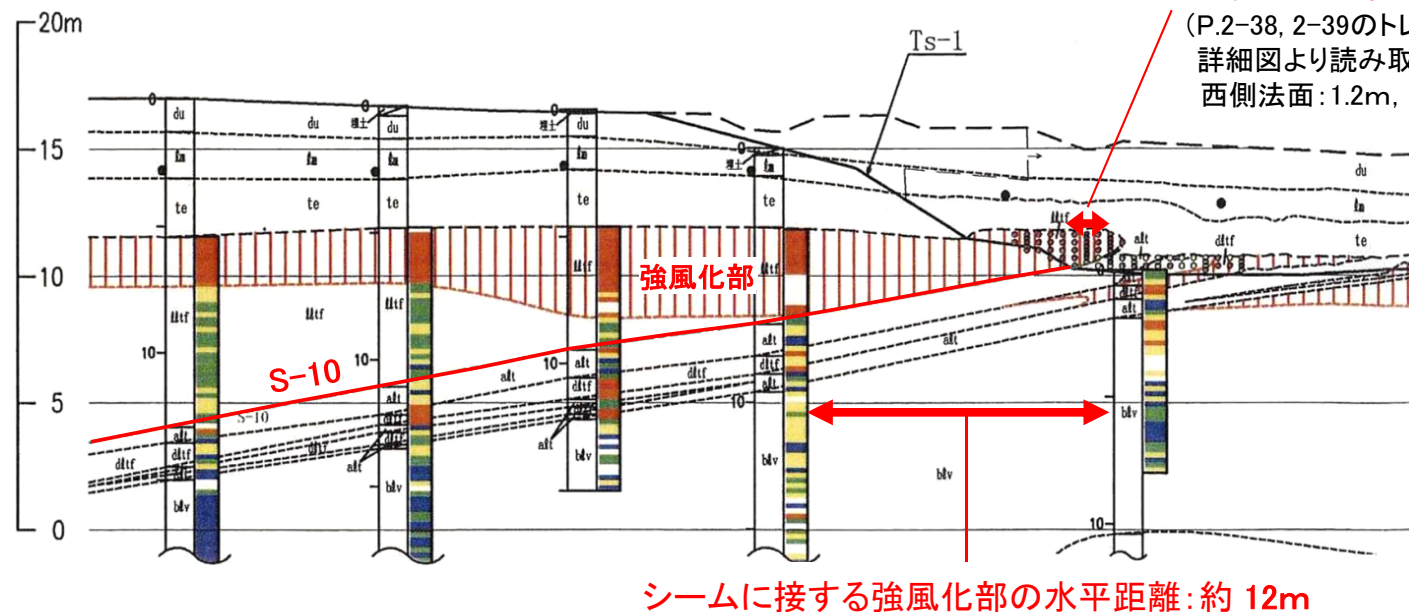
体積膨張率は強風化部
で平均約23%(約18%
~約28%), 弱風化部で
約7%を示す。

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(11/17)

②不動元素に基づく膨張率(8/10):

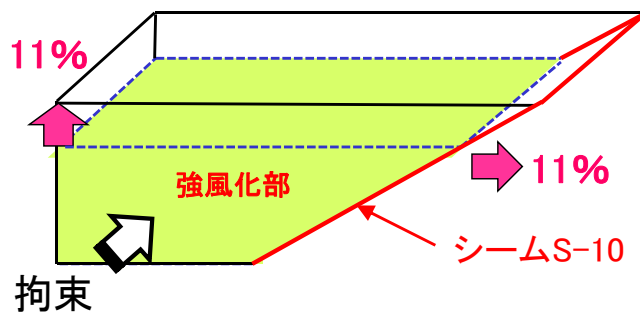
強風化部の体積膨張率と変位量の評価〔Ts-1トレンチ〕

(a) Ts-1トレンチ付近の観察結果に基づく水平方向膨張率



水平方向膨張率
 $= \text{水平変位量} / [(\text{シームに接する強風化部の水平距離}) - (\text{水平変位量})]$
 $= 1.0 / (12 - 1.0) \doteq 0.09 \Rightarrow \text{約} 9\%$

(b) 不動元素に基づく体積膨張率から求めた水平・鉛直方向膨張率



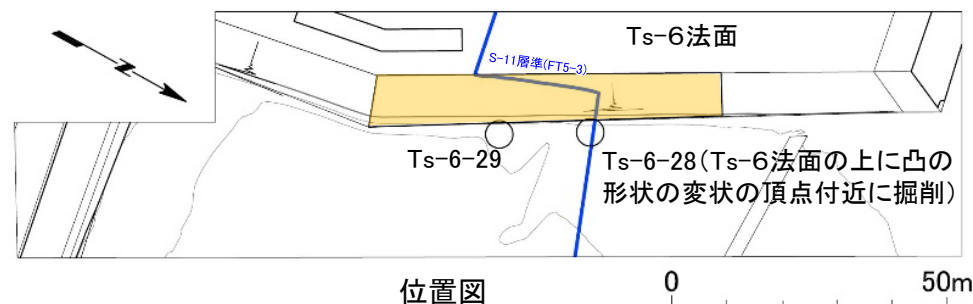
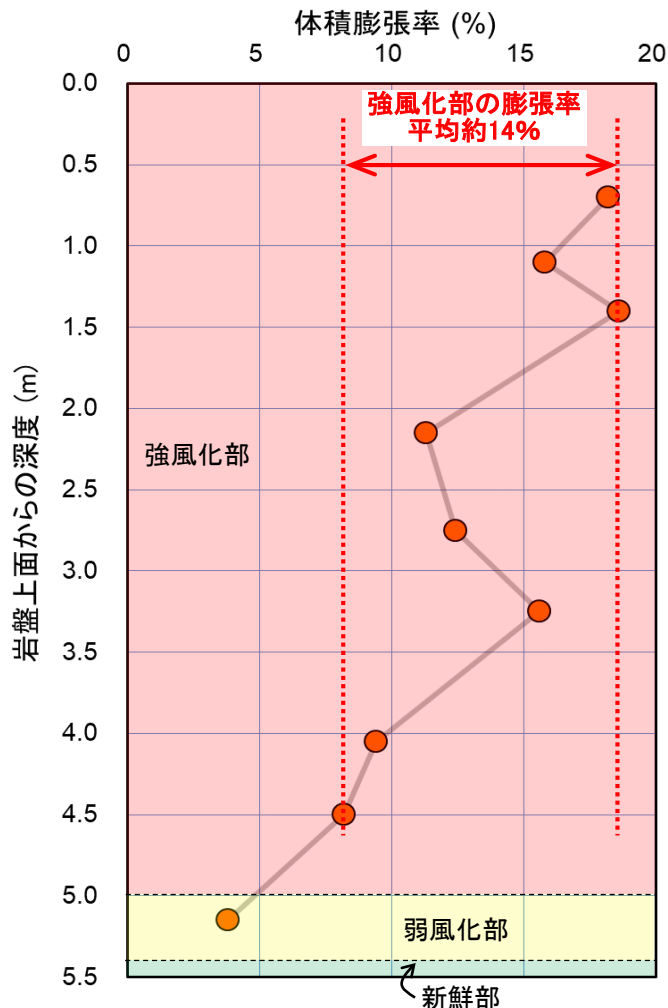
水平・鉛直方向膨張率算定条件:
 ・強風化部は等方的に水平・鉛直方向へ膨張
 ・シームの走向方向は拘束
 ・体積膨張率: 平均23% (P.8-25参照)

水平・鉛直方向膨張率
 $= (1 + 0.23)^{1/2} - 1 \doteq 0.11 \Rightarrow \text{約} 11\%$

(a)の観察結果と(b)の分析結果に基づき強風化部の水平方向膨張率は、共に10%前後で整合的である。

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(12/17)

②不動元素に基づく膨張率(9/10) 体積膨張率の算定結果[Ts-6法面]



- Ts-6法面で上に凸の形状の変状を生じた淡灰色火山礫凝灰岩について、Ts-6-28孔及びTs-6-29孔のシームS-11より下位のコア試料を用いて、乾燥密度比(ρ_d/ρ_r)と不動元素 Ti及びFeの濃度比(Ci^*/Ci_0^*)の平均値から体積膨張率を算定した。
- 深部から浅部への風化の進行に伴い体積膨張率は増加傾向を示す。
- 強風化部の体積膨張率の平均値は約14%(範囲:約8%~約19%)で、上に凸の形状の変状は側方が拘束された状態で形成されているため、体積膨張率はほぼ鉛直方向の膨張率に等しいものと考えられる。
- これらの結果から、低角の変位を伴う不連続面を利用して上に凸の変形を生じる変状も、シームを利用して段差を生じる変状と同様に、淡灰色火山礫凝灰岩の強風化部の形成に伴う膨張によって形成されたものと考えても矛盾しない。

注) 体積膨張率の算定に用いたデータはP.8-34参照。

深度と体積膨張率との関係(Ts-6法面)

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(13/17)

②不動元素に基づく体積膨張率(10/10):体積膨張率算定結果(Ts-6法面)

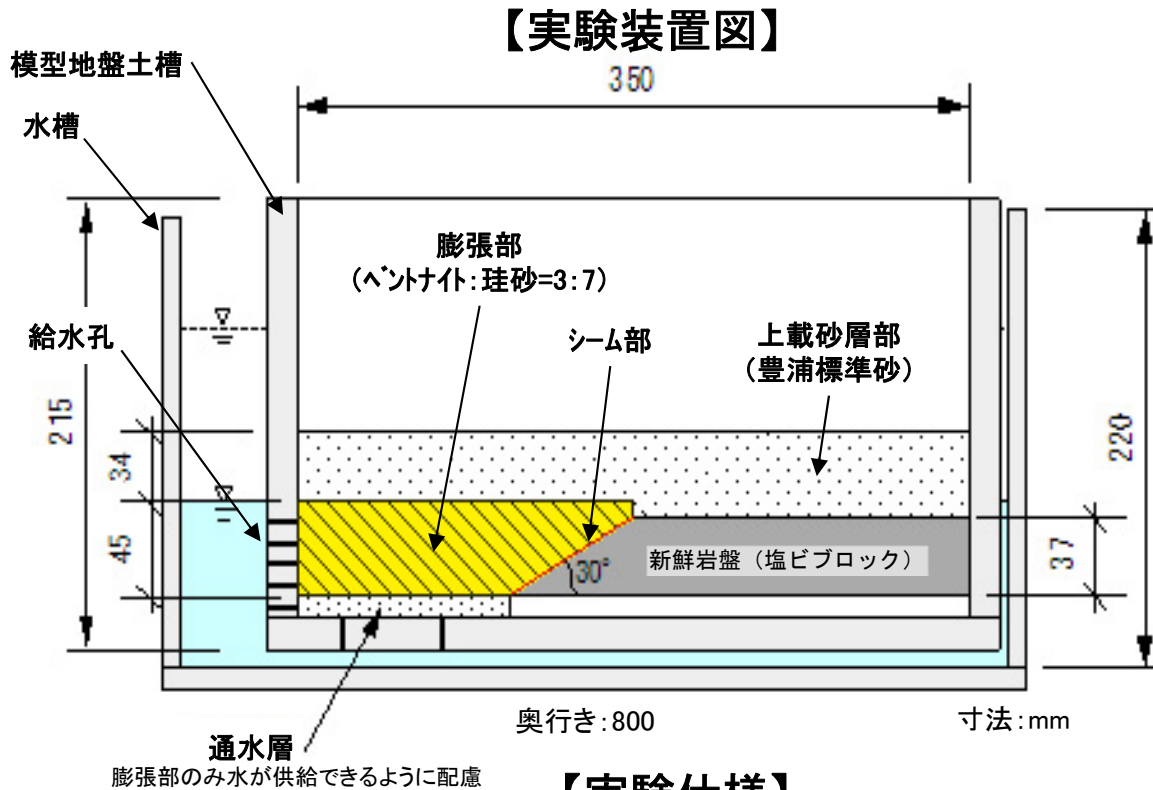
風化区分	試料						密度試験結果				XRF分析値 C ₁		不動元素濃度比 C ₁ /C ₀			体積膨張率 (wt%)
	ホーリング孔名	採取深度(m)		岩盤上面深度 (m)	岩盤上面からの深度 (m)	湿潤密度 ρ_{t1} (g/cm ³)	含水比 w(%)	乾燥密度 ρ_{d1} (g/cm ³)	乾燥密度比 ρ_{d0}/ρ_{d1}	TiO ₂ 濃度 (wt%)	Fe ₂ O ₃ 濃度 (wt%)	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Ti-Fe 平均値		
強風化部	Ts-6-28	4.75	-	4.85	4.10	0.70	1.290	89.2	0.682	1.855	1.36	12.72	1.56	1.58	1.57	18.2
		5.15	-	5.25	4.10	1.10	1.254	83.5	0.683	1.852	1.37	13.15	1.57	1.63	1.60	15.8
		5.45	-	5.55	4.10	1.40	1.290	93.5	0.667	1.897	1.41	12.73	1.62	1.58	1.60	18.6
		6.20	-	6.30	4.10	2.15	1.338	103.7	0.657	1.925	1.52	13.79	1.75	1.71	1.73	11.3
		6.80	-	6.90	4.10	2.75	1.352	100.6	0.674	1.877	1.44	13.45	1.66	1.67	1.67	12.4
		7.30	-	7.40	4.10	3.25	1.411	106.2	0.684	1.849	1.39	12.88	1.60	1.60	1.60	15.6
		8.10	-	8.20	4.10	4.05	1.461	103.4	0.718	1.762	1.40	13.00	1.61	1.61	1.61	9.4
		8.55	-	8.65	4.10	4.50	1.464	100.4	0.731	1.731	1.38	12.85	1.59	1.60	1.60	8.2
弱風化部		9.20	-	9.30	4.10	5.15	1.548	79.1	0.864	1.464	1.23	11.32	1.41	1.41	1.41	3.8
新鮮部	Ts-6-29	9.70	-	9.80	4.10	5.65	1.752	42.5	1.229	—	0.89	8.33	—	—	—	—
		10.45	-	10.55	4.10	6.40	1.742	34.7	1.293	—	0.86	8.08	—	—	—	—
		8.55	-	8.65	5.00	3.60	1.693	33.2	1.271	—	0.85	7.91	—	—	—	—
		9.20	-	9.30	5.00	4.25	1.682	32.6	1.268	—	0.86	7.86	—	—	—	—
							新鮮部平均値 ρ_{d0}, C_0		1.265	—	0.87	8.05	強風化部平均値			13.7
													弱風化部の値			3.8

- Ts-6-28孔(新鮮部～強風化部)及びTs-6-29孔(新鮮部)のシームS-11より下位のコア試料を用いて、乾燥密度比(ρ_{d0}/ρ_{d1})と不動元素 Ti, Feの濃度比(C_{i*1}/C_{i*0})の平均値から体積膨張率を算定した。
- Alは溶脱傾向が認められたため、体積膨張率の算定には用いなかった。
- 体積膨張率は強風化部で平均約14%(約8%～約19%), 弱風化部で約4%を示す。

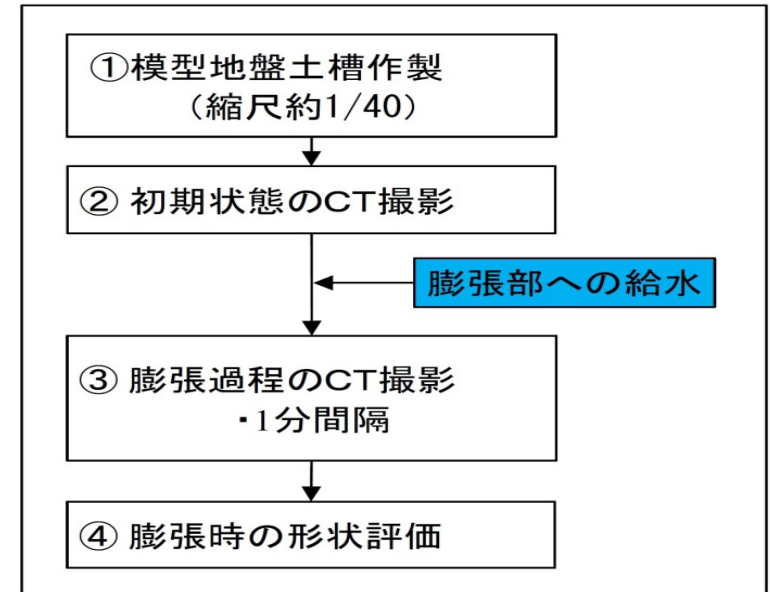


8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(14/17)

③膨張模型実験と観察結果との整合性(1/3): 強風化部の膨張模型実験の実験方法



【実施手順】



- Ts-1トレンチの変状を再現する目的で、縮尺1/40^{*}の地盤模型を作成し、膨張模型実験を行った。
- シーム上盤の強風化部をベントナイト+珪砂で作成し、吸水膨張により模擬(材料物性・発生応力等の相似則は考慮していない)。
- 給水前と給水後5分まで1分ごとにCT画像を撮影し、上載砂層の変状の形状を定性的に評価した。

対象トレンチ	トレンチにおける地質性状			模型地盤		
	層準・地質	傾斜角	風化区分	構成物	傾斜角	
Ts-1	M ₃ 面段丘堆積物	段丘堆積物(砂礫層)	-	-	上載砂層(乾燥状態の豊浦標準砂)	-
	易国間層	上部層(上盤側) ^{*1}	-	強風化	膨張部(ベントナイト+珪砂) ^{*3}	-
		S-10	25° ~ 27°	-	シーム部(OHPシート2枚重ね)	30°
		下部層(下盤側) ^{*2}	-	新鮮~弱風化	新鮮岩盤(塩ビブロック)	-

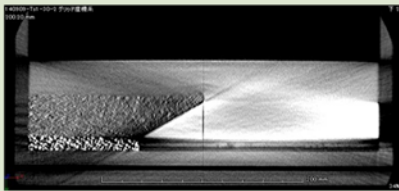
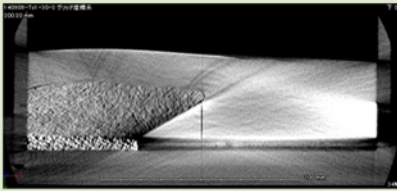
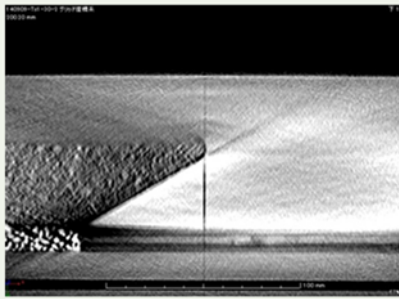
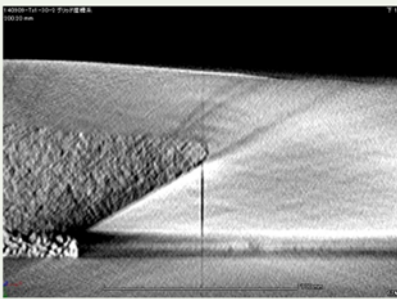
*1: 淡灰色火山礫凝灰岩
*2: 粗粒・細粒凝灰岩互層と暗灰色火山礫凝灰岩
*3: クニゲルGX

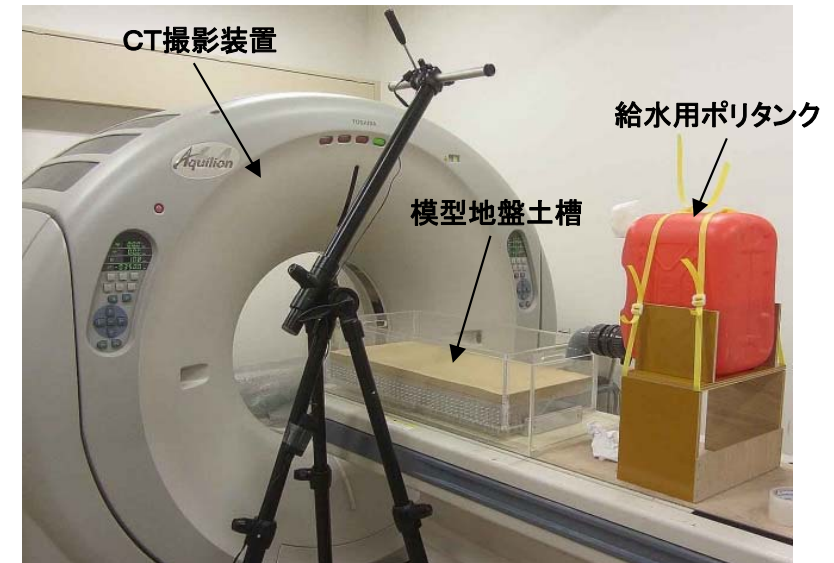
※: 医療用X線CTIによる撮影が可能な大きさ。

8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(15/17)



③膨張模型実験と観察結果との整合性(2/3):強風化部の膨張模型実験の実験結果

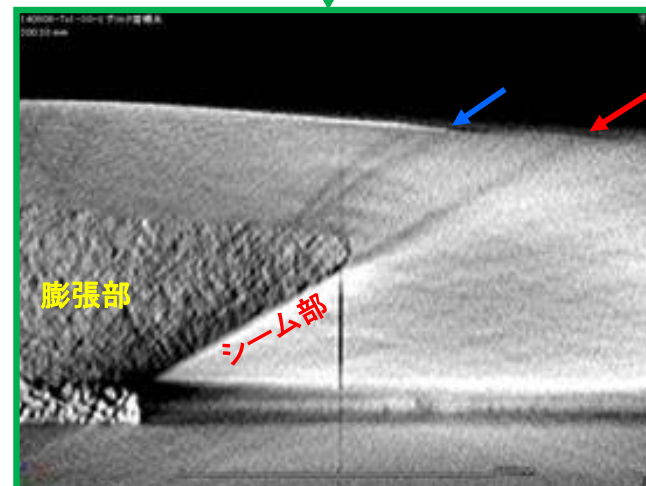
CT画像によるせん断面発生状況(土槽中央断面)

	初期乾燥状態 (吸水前)	体積膨張率約22% (3分後)
全体		
拡大		



実験状況



:せん断面が上載砂層(豊浦標準砂)の上面に到達した位置



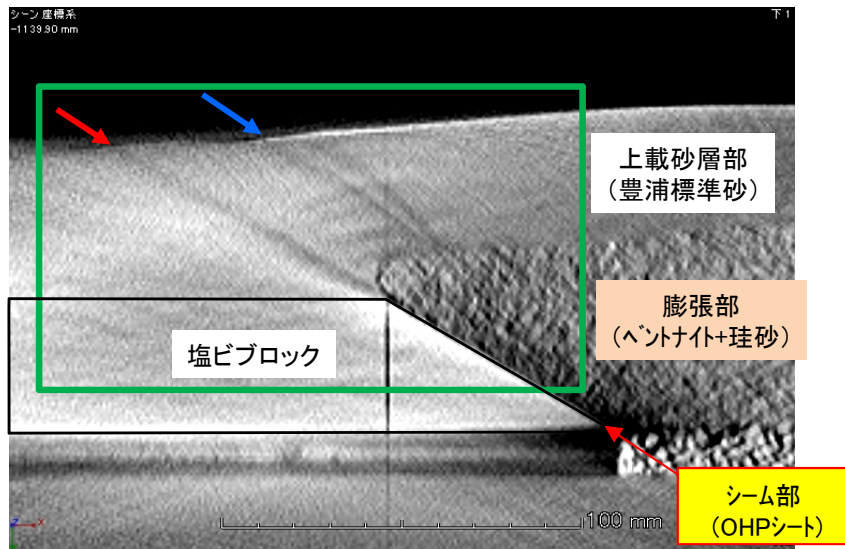
給水開始から3分後の体積膨張率約22%のCT画像

シーム部の延長上(赤矢印)及び膨張部の先端から上方(青矢印)の上載砂層部中にせん断面が発生することを確認した。



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(16/17)

③膨張模型実験と観察結果との整合性(3/3):実験の結果とTs-1トレンチの変状との対比

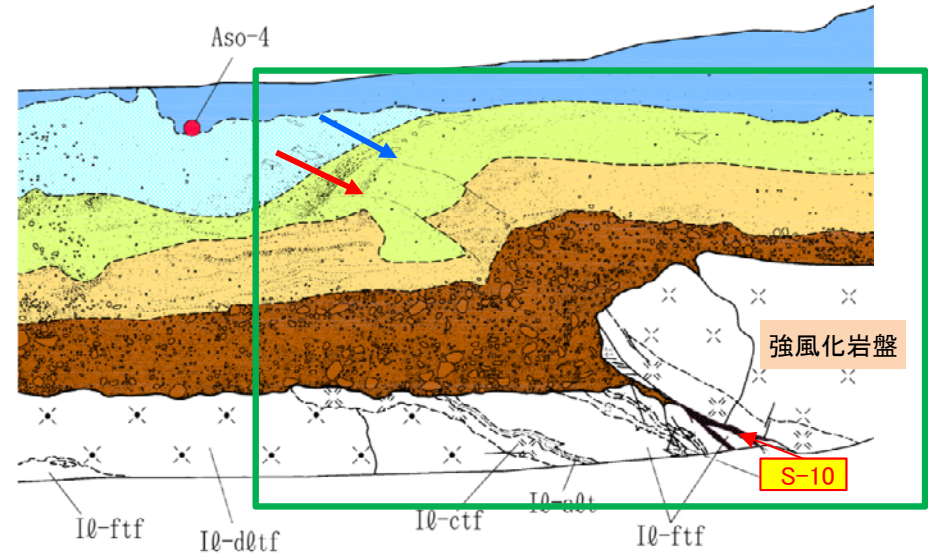


CT画像(前頁の画像を左右反転)

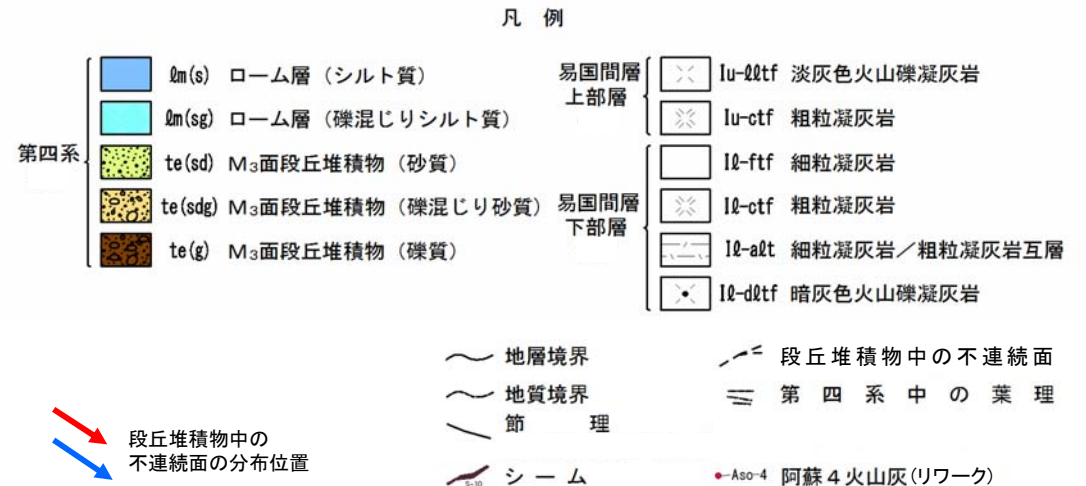
【体積膨張率約22%:給水開始から3分後】



Ts-1トレンチで推定される体積膨張率約23%(P.8-25参照)と同程度の膨張率約22%で生じた上載砂層部のせん断面の発生位置は、Ts-1トレンチ東側法面の変状弱面の分布位置に整合的である。



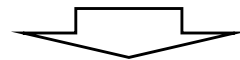
Ts-1トレンチ東側法面詳細図



8.2.2 膨張率に関する文献に基づく検討(17/17)

膨張率に関する文献に基づく検討のまとめ

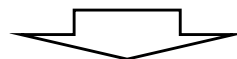
- 膨張率に関する文献に基づく検討の結果、層厚変化及び不動元素から求めた膨張率はほぼ同じ値となり、変位量の観察結果と整合的であることが確認された。
- 段丘堆積物中の不連続面の分布は、同程度の膨張率における模型実験結果と整合的であることが確認された。



風化に伴う岩盤の膨張及び膨張率に関する検討結果は、強風化部の膨張に矛盾しない。膨張率等は観察結果及び模型実験結果と整合的

変状弱面のノンテクトニックな形成要因のまとめ

- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、風化に伴う岩盤の膨張、地震動等の複数の要因により形成されたノンテクトニックな構造と考えられる。
- 強風化部の膨張は、風化に伴って形成されたスメクタイトの吸水膨張及び岩石組織の破壊に伴う応力解放によるものである可能性がある。
- 風化に伴う地層の層厚変化及び不動元素の分析結果に基づいて求めた膨張率は、観察結果と矛盾しない。



- 変状弱面の形成の要因は特定できないものの、非構造的な複数の要因(風化に伴う岩盤の膨張、地震動等)によるものと考えられる。
- 強風化部の形成に伴う岩盤の膨張は分析・観察結果と矛盾しないが、地震動等の影響も否定できない。
- これら複数の要因は、少なくとも変状弱面が非構造的なものだと判断されること(本編資料P.4-78参照)と矛盾しない。

(余白)

9. 変状弱面の分布範囲の特定(1/4)

シームS-11とcf-3断層との切断関係及び風化性状(Tf-5(a)トレンチ)

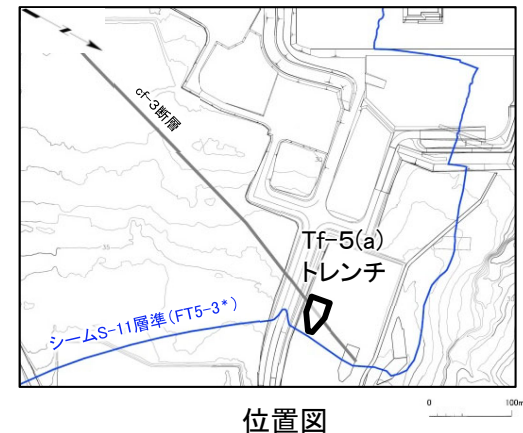
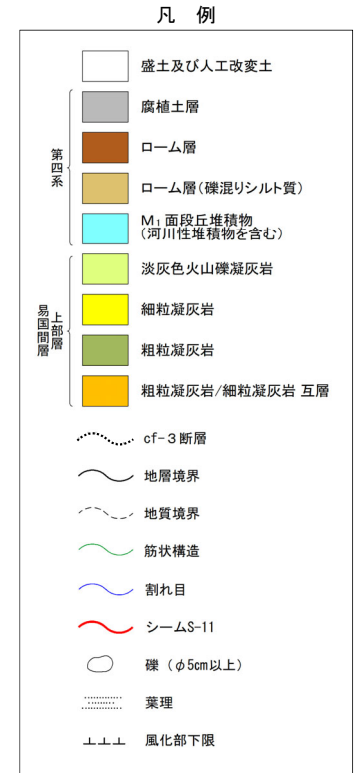
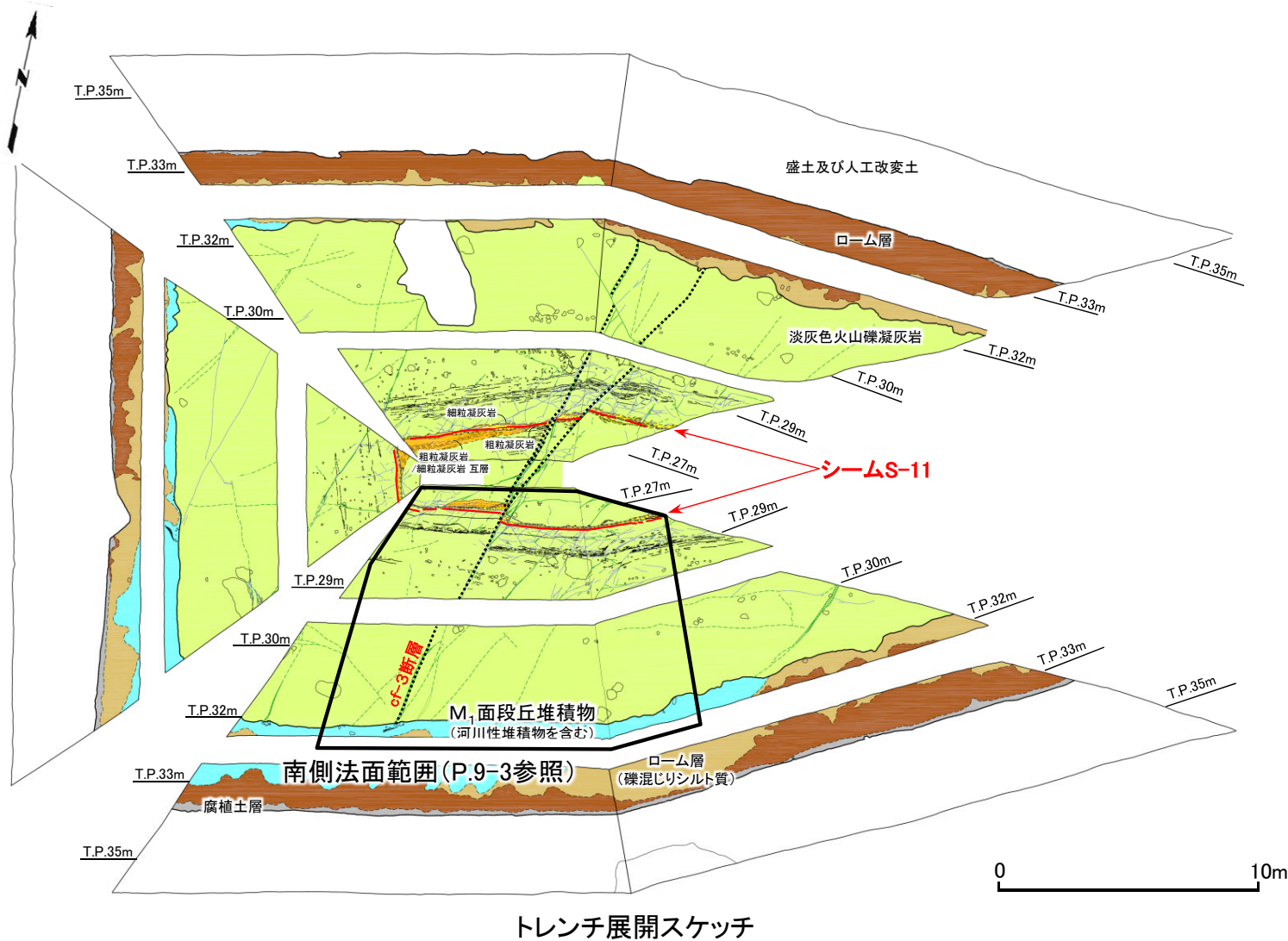
[本編資料4.3章(2)に関する基礎データ]

- ps-1弱面の分布範囲を限定するTf-5(a)トレンチにおけるシームS-11とcf-3断層との切断関係及び風化性状に関する観察結果

9. 変状弱面の分布範囲の特定(2/4)



Tf-5(a)トレンチ: シームS-11とcf-3断層との切断関係



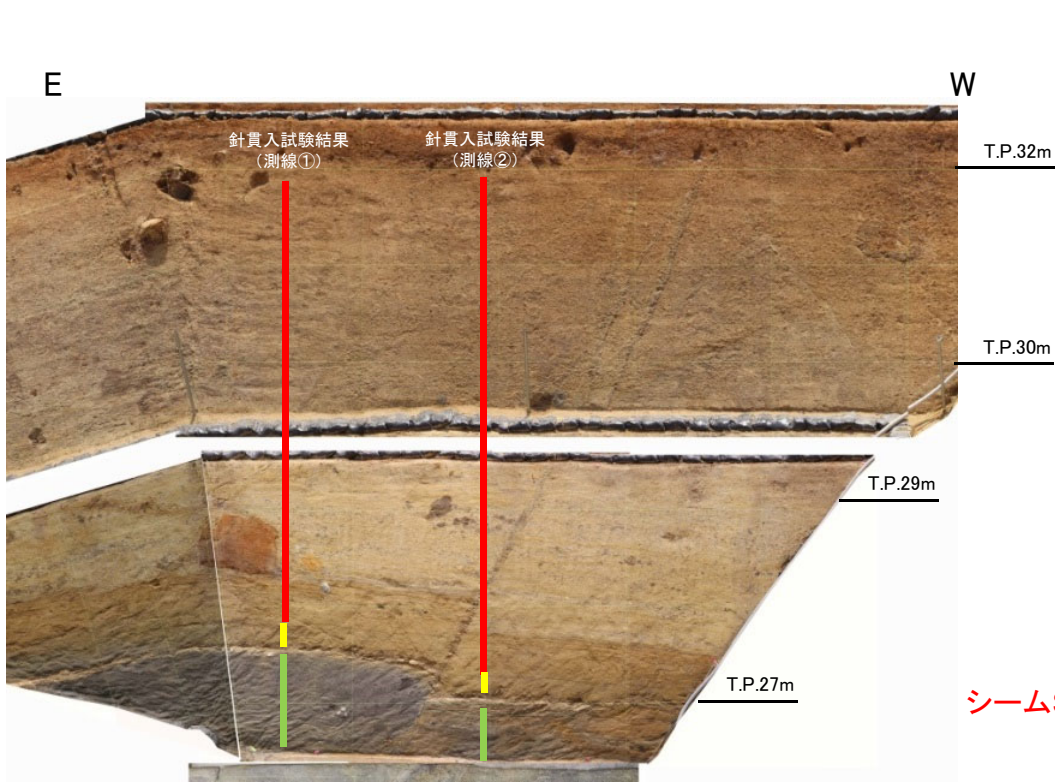
Tf-5(a)トレンチでは、シームS-11上盤の弱風化部(P.9-3参照)がシームに接しており、シームはcf-3断層に切れ、それ以降シーム沿いに変位はないことから、ps-1弱面は分布しないと判断される。

*: シームS-11を挟むする細粒凝灰岩の鍵層名。

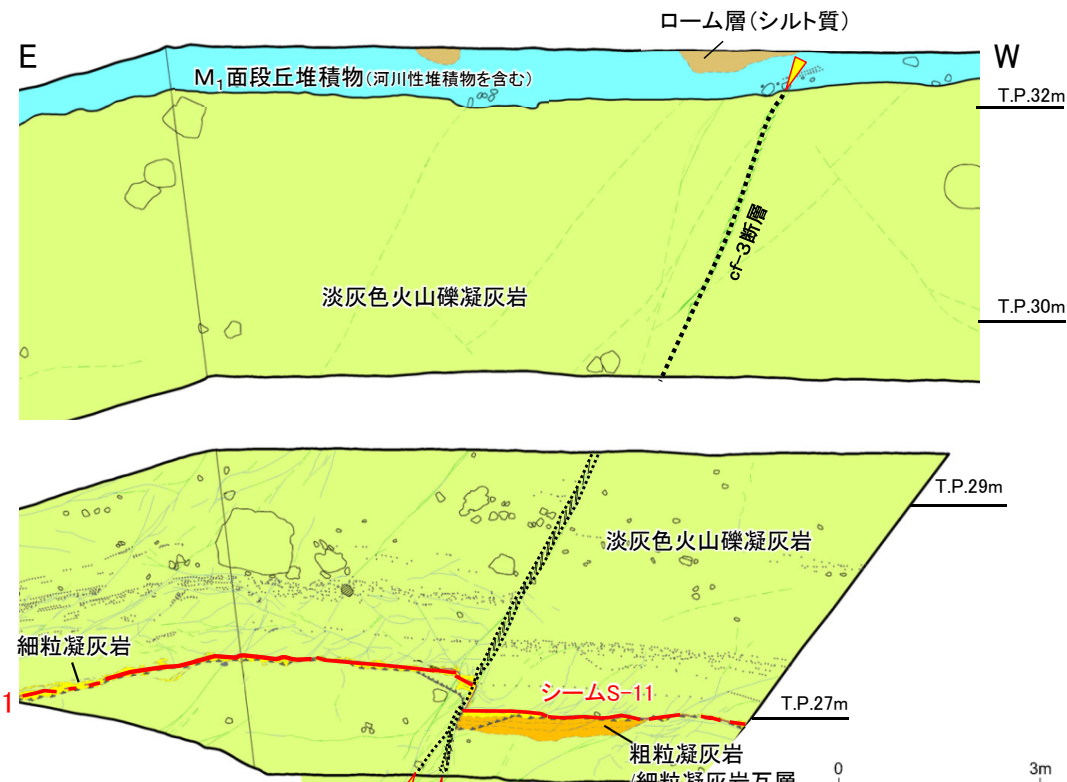
9. 変状弱面の分布範囲の特定(3/4)



Tf-5(a)トレンチ南側法面: シームS-11の上盤の風化性状とps系弱面の分布



南側法面写真



南側法面スケッチ

針貫入勾配区分(N/mm)

—	主に0.0-0.5 (強風化部)
—	主に0.5-2.0 (弱風化部)
—	主に2.0-12.0 (新鮮部)

凡 例

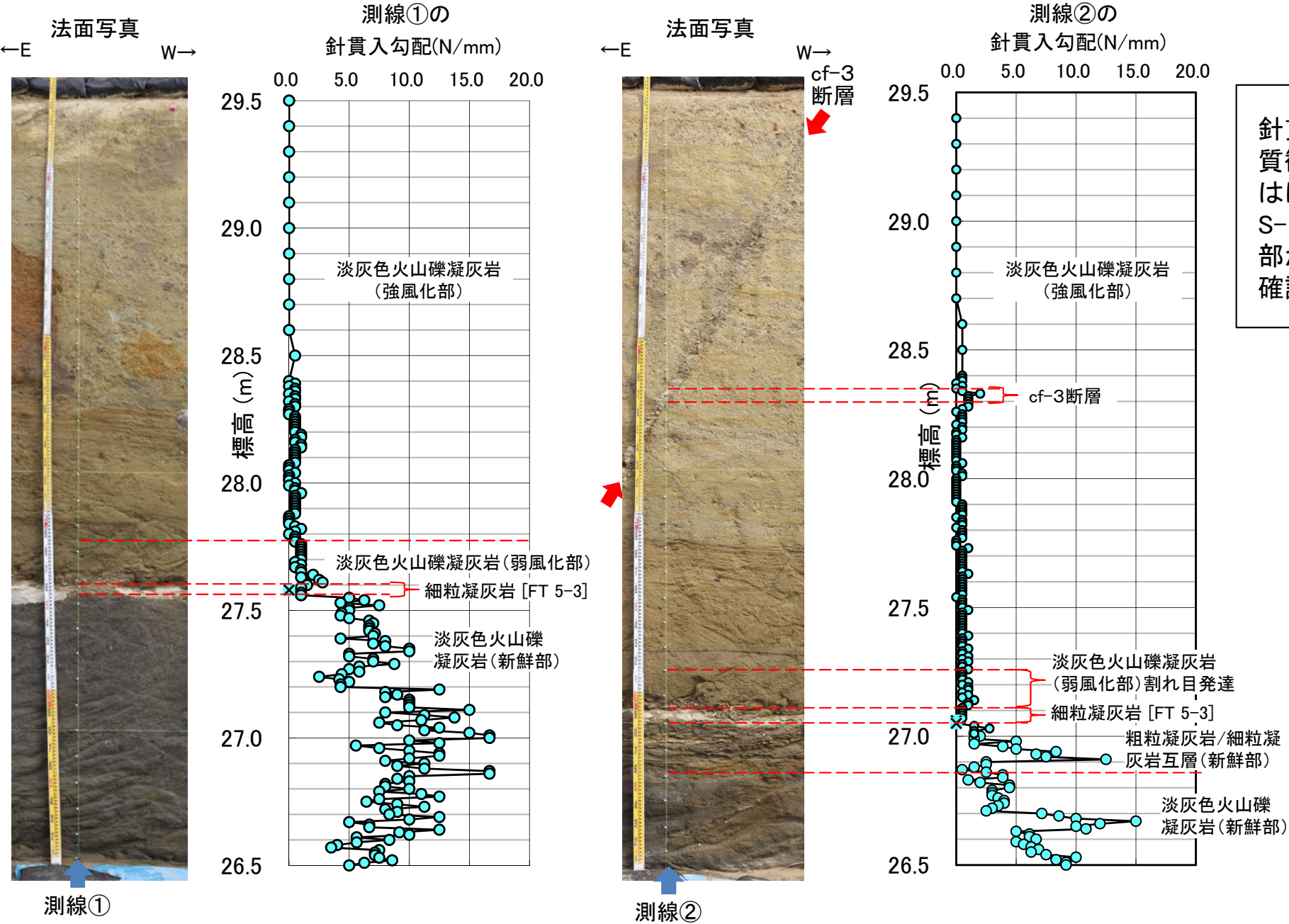
lm1	ローム層(シルト質)		cf-3断層	—	シームS-11
te	M ₁ 面段丘堆積物(河川性堆積物を含む)		地層境界		礫(φ5cm以上)
qtz	淡灰色火山礫凝灰岩		地質境界		葉理
ftf	細粒凝灰岩		筋状構造		風化部下限
ctf/ftf	粗粒凝灰岩/細粒凝灰岩 互層		割れ目		

Tf-5(a)トレンチでは、シームS-11は弱風化部に接しており、強風化部はシームに接していない(P.9-4参照)。

9. 変状弱面の分布範囲の特定(4/4)



Tf-5(a)トレンチ南側法面: 針貫入試験結果



針貫入試験の結果と地質観察による風化区分はほぼ整合的で、シームS-11の層準には強風化部が達していないことを確認した。

- 凡例
- 試験実施箇所 (試験実施箇所の状態)
 - × 割れ目発達
 - △ 礫が分布する可能性あり
- (風化区分 針貫入勾配概略値)
- 強風化部: 1 N/mm未満*
 - 弱風化部: 1~2 N/mm*
 - 新鮮部: 7~8 N/mm*
- *淡灰色火山礫凝灰岩における平均値の範囲

10. 重要な安全機能を有する施設(MMR等を含む)と 変状弱面の分布評価範囲との関係(1/4)

重要な安全機能を有する施設(MMR等を含む)と変状弱面の分布評価範囲との関係

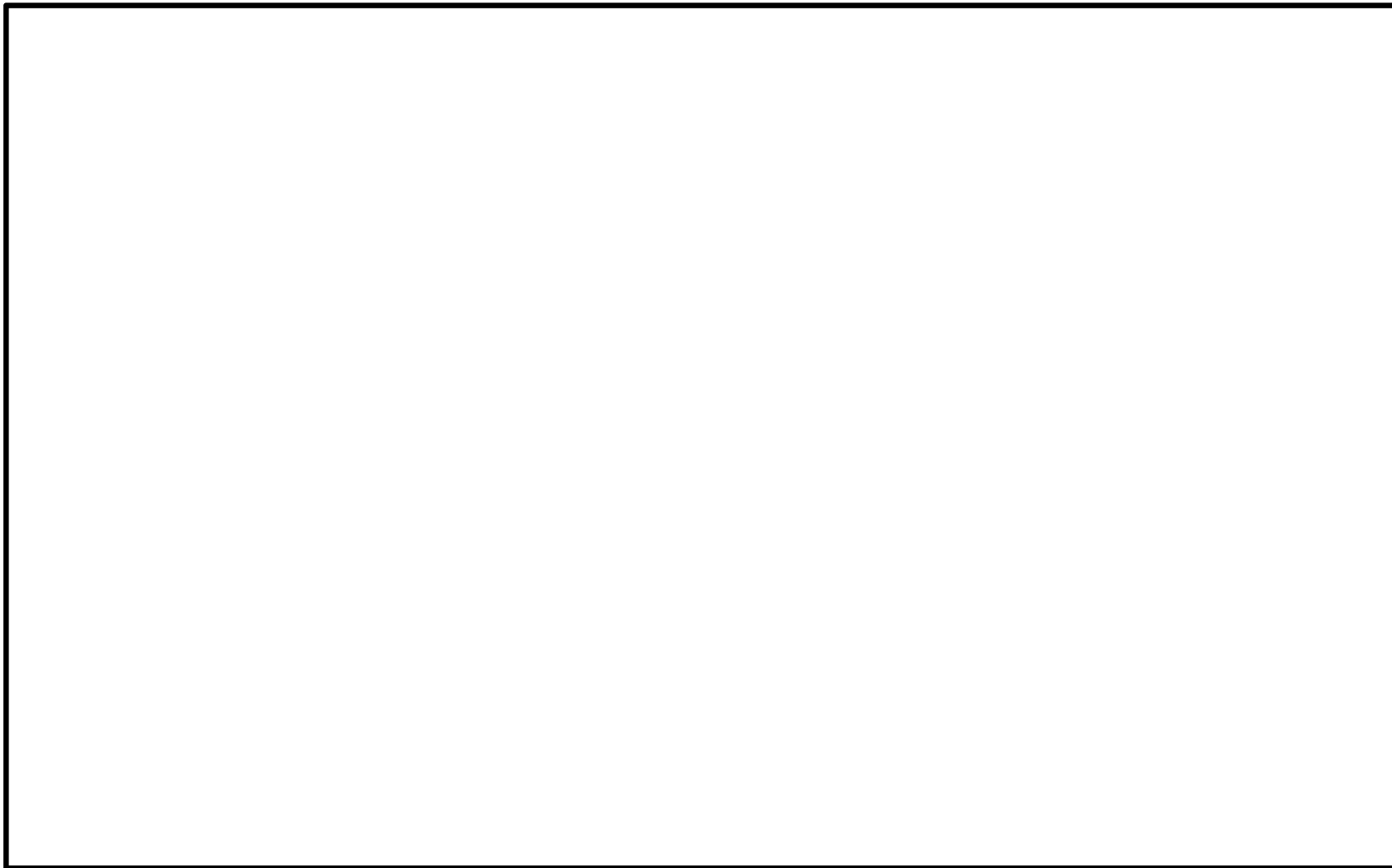
[本編資料4.4章(1)に関する補足説明]

- 重要な安全機能を有する施設及びMMR等も表示し、変状弱面の分布評価範囲との関係を示す。

10. 重要な安全機能を有する施設(MMR等を含む)と 変状弱面の分布評価範囲との関係(2/4)



変状弱面の分布評価範囲と重要な安全機能を有する施設との位置関係



凡 例

- 耐震重要施設 *1
- 常設重大事故等対処施設 *2
- シームS-11層準(FT5-3)*3 が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- シームS-10が第四系基底面、掘削面等に現れる位置
- 断層 (確認部)
(cf断層系, sF断層系及びdF断層系)
- 断層 (大畑層による伏在部)
(sF-2断層系及びdF断層系)
- 断層端部があると考えられる区間
(cf断層系及びdF断層系)
- 断層 (海底地形による推定部)
(sF-1断層)
- シームS-11層準付近の変状弱面の分布評価範囲

- *1 設置許可基準規則第三条の対象となる耐震重要施設(間接支持構造物を含む)。
- *2 設置許可基準規則第三十八条の対象となる常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く)。
- *3 シームS-11を挟む細粒凝灰岩の鍵層名。
- *4 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の第三条の「耐震重要施設」及び第三十八条の「重大事故等対処施設」をいう。



変状弱面の分布評価範囲は、重要な安全機能を有する施設に位置しないことから、重要な安全機能を有する施設*4の基礎地盤には変状弱面は分布しない。

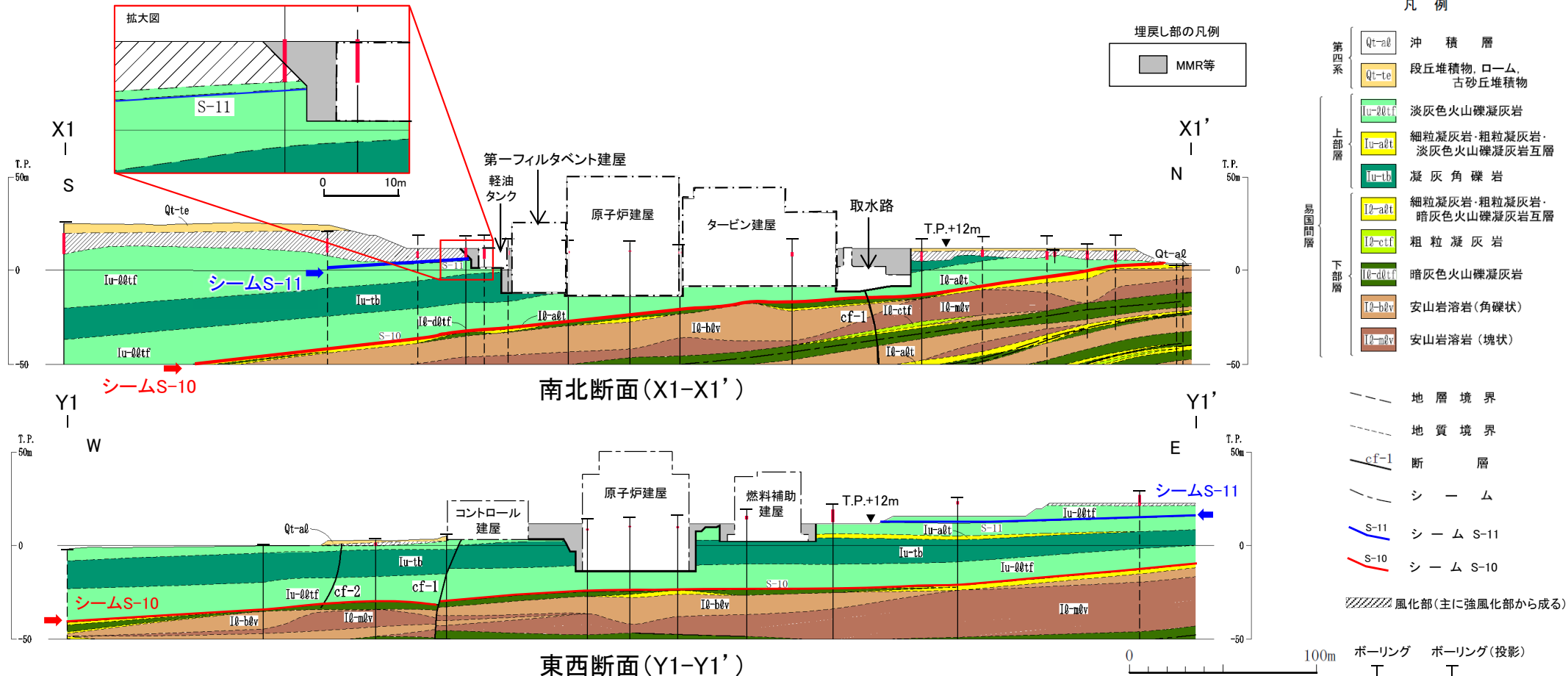
注1) 断層の分布はT.P.-14mにおける位置。
 注2) 本図のシームS-11層準(FT5-3)*3の位置は、平成30年5月末時点の掘削面の地質データに基づいて示した。なお、今後掘削する計画の軽油タンク、第一フィルタベント建屋及び燃料補助建屋の部分については、構造物側面に沿って鉛直に掘削するものとして表示した。
 注3) 海域のdF断層系の断層については、個別の断層名を区別せずに扱うが、識別する必要がある場合を踏まえ、dF-m1～dF-m4断層として記載する。

で示す箇所は、商業機密あるいは防護上の観点から公開不可としているもので、白抜きとしてあります。

10. 重要な安全機能を有する施設(MMR等を含む)と変状弱面の分布評価範囲との関係(3/4)

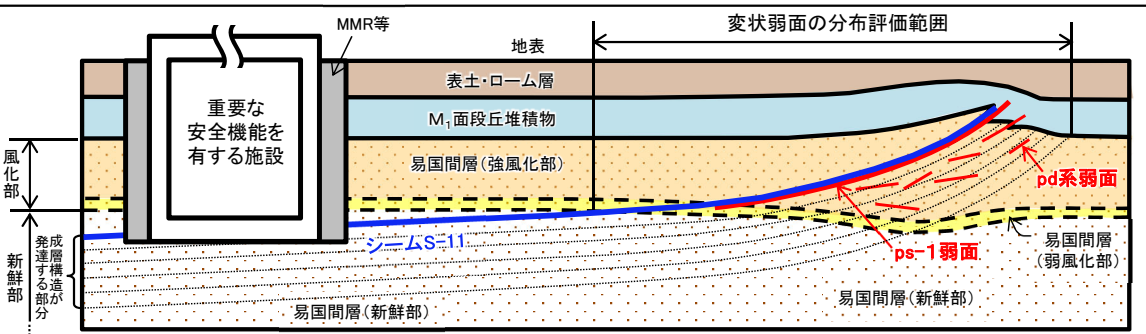


原子炉建屋付近における変状弱面の分布評価範囲の分布



注) ボーリングは工事着手前の原地形で掘削。

X1-X1'断面及びY1-Y1'断面では各施設のMMR等に変状弱面の分布評価範囲は分布しない。



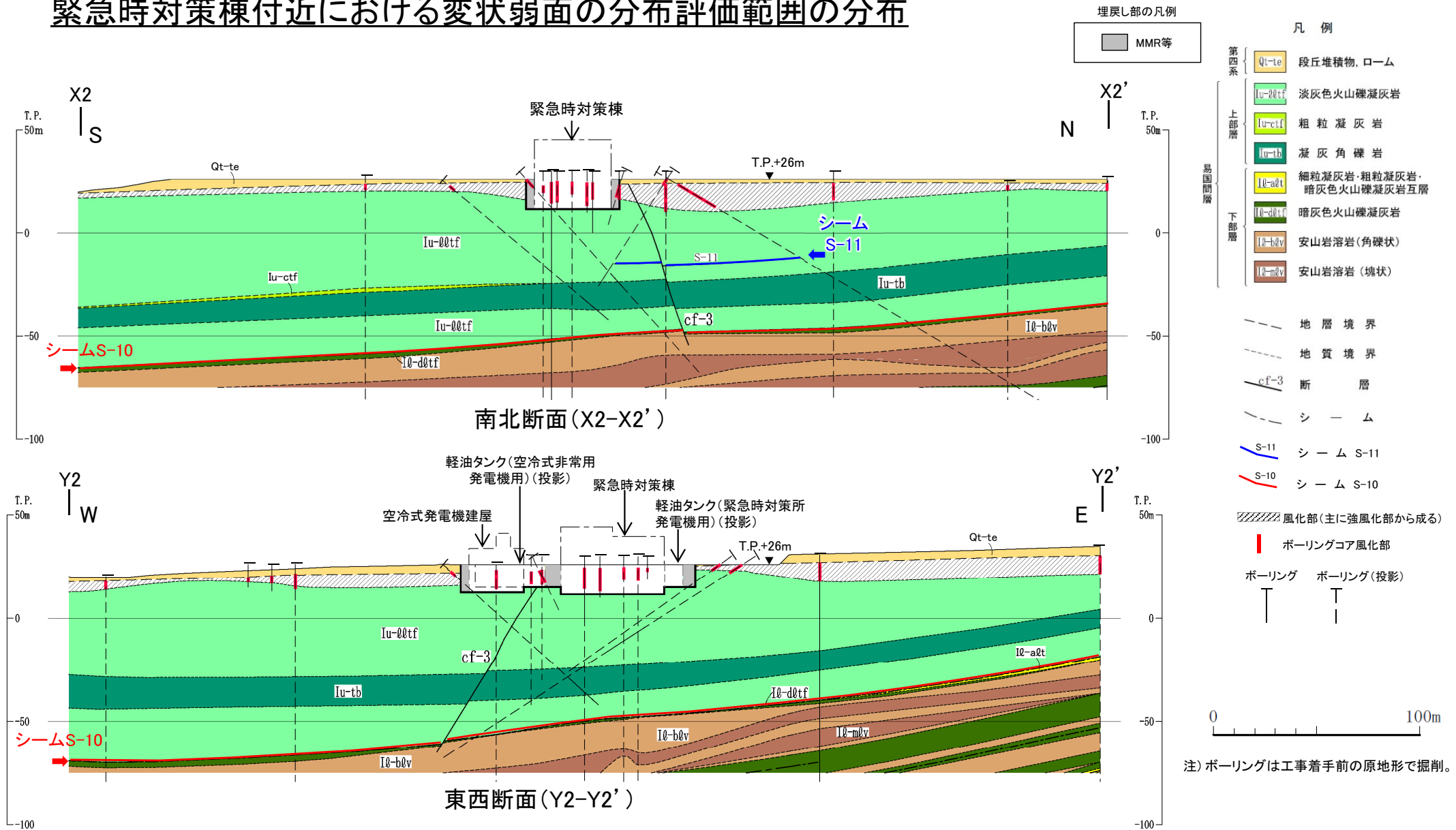
変状弱面の分布評価範囲と重要な安全機能を有する施設の関係 概念図※

※ 変状弱面の分布評価範囲の詳細は本編資料P.4-104参照。

10. 重要な安全機能を有する施設(MMR等を含む)と 変状弱面の分布評価範囲との関係(4/4)



緊急時対策棟付近における変状弱面の分布評価範囲の分布



各施設のMMR等には変状弱面の分布評価範囲は分布しない。

参考文献



1. 貝塚爽平・太田陽子・小疇尚・小池一之・野上道男・町田洋・米倉伸之(1985):写真と図でみる地形学, 東京大学出版社, p.250
2. 高橋健一(1975):日南海岸青島の「波状岩」の形成機構, 地理学評論, 48, pp.43-62
3. Burg, J. P. (2017): Structural Geology and Tectonics, 4. Thrust Systems, pp.317-318
4. Bui, T. D. (2004): Neural Network Analysis of Sparse Datasets - An Application to the Fracture System in Folds of the Lisburne Formation, Northeastern Alaska, Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, p.9
5. 永田秀尚(2018):ノンテクトニック地質構造の研究:研究事例と展望, 地質学雑誌, Vol.124, No.11, pp.904-905.
6. Noe, D. C. and Dodson, M. D. (1999):Heaving bedrock hazards associated with expansive, steeply dipping bedrock, Douglas county, Colorado (Vol. 42). Colorado Geological Survey, Dept. of Natural Resources. p.13
7. 栗山健弘・吉田英一・山本博文・勝田長貴(2006):河岸段丘礫の表面風化にみる酸化フロントの形成とその移動速度, 地質学雑誌, 第112巻, 第2号, pp.136-152永田秀尚(2018):ノンテクトニック地質構造の研究:研究事例と展望, 地質学雑誌, Vol.124, No.11, pp.904-905.
8. 濱田崇臣(2012):段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討(その2)ー段丘礫の風化状態の把握と対比指標の適用条件の提示ー. 電力中央研究所報告, N12007, 24p.
9. Colman, S.M. and Pierce, K.L.(1981): Weathering rinds on andesitic and basaltic stones as a Quaternary age indicator, Western United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1210, 56p.
10. Arai, T., Yusa, Y., Sasaki, N., Tunoda, N. and Takano, H. (1988) : Natural analogue study of volcanic glass-A case study of basaltic glass in pyroclastic fall deposits of Fuji volcano, Japan. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 127, pp.73-80
11. Friedman, I. and Smith, R. L. (1960):A new method using obsidian-Part I, The development of the method, American Antiquity, 25, pp.476-522
12. Katsui, Y. and Kondo, Y. (1965):Dating of stone implements by using hydration layer of obsidian, Jap. J. Geol. Geogr., 36, pp.45-60
13. Yamaji, A., Sato, K. and Otsubo, M. (2011):Multiple Inverse Method Software Package (ver.6) <http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/tsg/software/mim/>
14. ノンテクトニック断層研究会編(2015):ノンテクトニック断層ー識別方法と事例ー, 近未来社, p.248
15. Hanson, K. L., Kelson, K. I., Angell, M. A. and Lettis, W. R. (1999): Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5503, p.2-100
16. 千木良雅弘(1988):泥岩の化学的風化ー新潟県更新統灰爪層の例ー, 地質学雑誌, Vol.94, pp.419-431
17. 前田寛之・河野勝宣・小竹純平・安藤勲(2014):統成帯硬質頁岩を基岩とする受け盤型地すべりにおける風化帯の重要性, 日本地すべり学会誌, Vol.51, No.1, pp.13-20
18. 鳥居起志・北川隆司・地下まゆみ(2006):神戸層群豊岡凝灰岩部層中に生成しているスメクタイトの鉱物学的特徴, 粘土科学, Vol.45, No.4, pp.238-249
19. 米田哲朗・大河原文正・渡辺隆(1999):北海道積丹半島豊浜トンネル付近の水冷火砕岩に産するスメクタイト, 粘土科学, Vol.39, No.2, pp.53-64.
20. 湯佐泰久・新井隆・亀井玄人・高野仁(1991):廃棄物ガラスの長期浸出挙動に関するナチュラルアナログ研究, 日本原子力学会誌, Vol.33, No.9, pp.890-905
21. Chabrilat, S. and Goetz, A. F. (1999):The search for swelling clays along the Colorado Front Range: the role of AVIRIS resolution in detection, In 1999 Proceedings from the Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication, <http://makalu.jpl.nasa>.
22. Jones, L. D. and Jefferson, I. (2012): Expansive soils, Institute of Civil Engineers Publishing, London, pp. 413-441
23. Azam, S., Ito, M., and Chowdhury, R. (2013):Engineering properties of an expansive soil, In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp.199-202
24. Fityus, S. G. and Smith, D. W. (2004): The development of a residual soil profile from a mudstone in a temperate climate, Engineering Geology, Vol.74, pp.39-56
25. 小口千明・八田珠郎・松倉公憲(1993):火山岩の風化プロセスー従来の研究とその問題点ー, 筑波大学水理実験センター報告, No.18, pp.5-17
26. Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z., Cong, B., Hirajima, T., Enami, M. and Zhai, M. (1993): Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. European Journal of Mineralogy, Vol.5, No.1, pp.141-152.
27. Delvigne, J.E.(1998): Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering, The Canadian Mineralogist Special Publication 3, pp.153-155
28. 荒井融・名取二郎(1991):粉末X線回折法による骨材中の有害鉱物の定量化についてーローモンタイトおよびスメクタイトー, 応用地質, vol.32, No.5, pp.221-231
29. 岩崎敬(1979):モンモリロナイトのX線底面反射と層間陽イオンの関係ー特にCaおよびNaの分布についてー, 鉱物学雑誌, vol.14, pp.78-89
30. Folk, R. L. and Patton, E. B. (1982):Buttressed expansion of granite and development of grus in central Texas. Zeitschrift fur Geomorphologie, Vol.26, No.1, 17-32
31. Driscoll, R. M. C. and Chown, R. (2001):Shrinking and swelling of clays. In Problematic soils symposium, pp. 53-66
32. 千木良雅弘・中田英二(2013):様々な岩石の風化に伴う体積膨張とその地質学的意義, 日本地質学会学術大会講演要旨 2013, p.297.
33. Cornu, S., Lucas, Y., Lebon, E., Ambrosi, J. P., Luizão, F., Rouiller, J., Bonnay, M. and Neal, C. (1999). Evidence of titanium mobility in soil profiles, Manaus, central Amazonia. Geoderma, 91(3-4), pp.281-295
34. Du, X., Rate, A. W. and Gee, M. M. (2012): Redistribution and mobilization of titanium, zirconium and thorium in an intensely weathered lateritic profile in Western Australia. Chemical Geology, 330, pp.101-115
35. Grant, J.A. (1986) :The Isocon diagramー A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. Economic Geology 81, pp.1976-1982