

第三部 “第四系変状” の実像

第二部で“岩盤劣化膨張説”が完全に架空の作り話であることが分かった。これで惑わされることなく“第四紀変状”の実態と原因の解明に進むことができるだろう。

1. “第四系変状”とは何？

東通原発敷地内には“第四系の変状”なるものが観察地点（大部分は掘削したトレンチ）の実に約40%で観察されている。“第四系変状”とはFig. 1のようなものである。沢山の種類があるかのように見えるが、実は単純である。

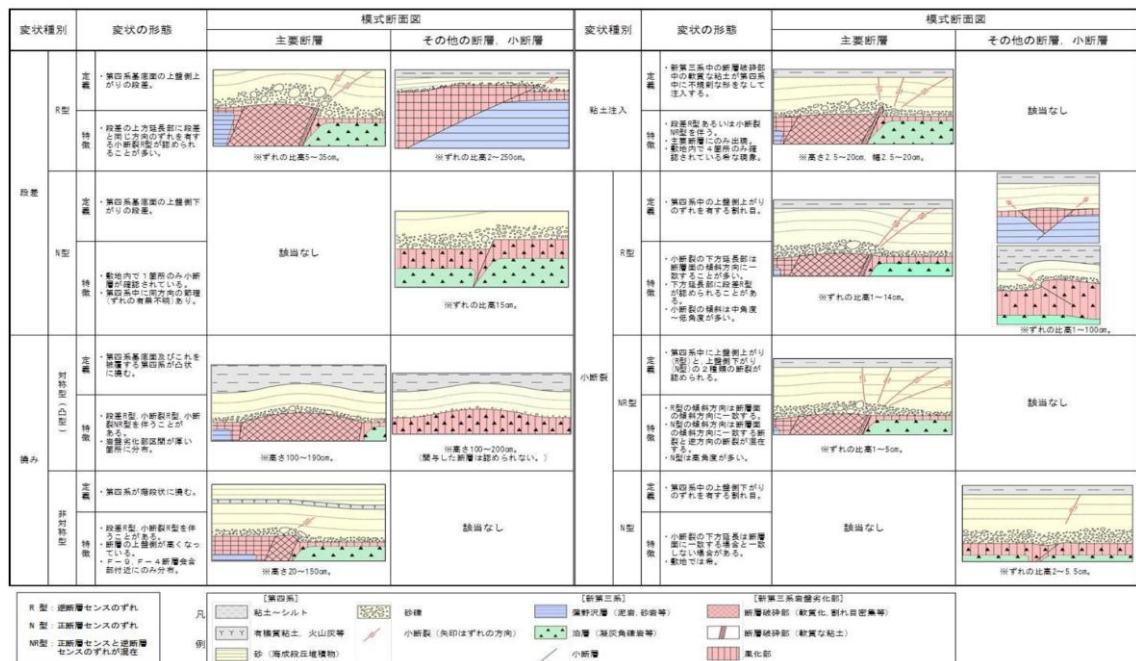


Fig. 1 “第四系変状” の分類（第4回評価会合配布資料 別添より転載）

上の図の“主要断層”とは、東通地域で中新世に活動した大き目の正断層群のことで、幅数10cm~1m前後の断層破砕帯を伴っている。これらは第四紀にもウジウジと活動していて、活断層かと疑われている。これらの破砕帯は軟質で、それが上方に押し出され、被覆する直上の第四系がしばしば背斜状に撓んでいる。時には著しく柔らかい断層粘土が第四系に注入していることもある（Fig. 2）。押し出す原動力として2つが考えられる。ひとつは、断層粘土に含まれるモンモリロナイトが膨張すること、他の一つは破砕帯の両側の壁がテクトニックな応力で圧縮されることである。両者ともあり得るメカニズムだが、平板間のクエットの流れなので、変形構造だけで区別することは難しい。しかし、テクトニック応力による絞り出しの方が、逆断層が伴われることと軟質断層粘土が注入しているこ

とを説明し易いかもしれない。

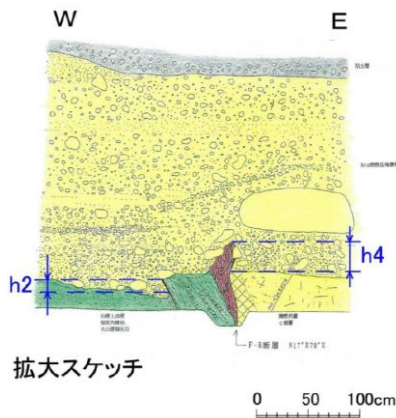


Fig. 2 h トレンチでの F-8 断層の“第四系変状”. 破砕帯の西縁に約 8cm E-up の逆断層運動, および高さ約 20cm の軟質断層粘土の注入が認められる. 第 9 回評価会合 参考資料 2-2 から転載.

“主要断層”の破砕帯のどちらかの縁に沿って, 逆断層的な滑りが起きていることも稀ではない. このような小逆断層が第四系中まで進展し, 変位させる. そのような場合には, 破砕帯直上の第四系の背斜状撓みは非対象になる.

“主要断層”以外の所でも普通に背斜状撓みが認められる. 波長は様々だが, 20m前後のものがよく目に付く. 背斜状撓みがこれと平行な小逆断層と相伴って出現することが多いので, 背斜状撓みは座屈褶曲だと思われる.

“主要断層”の破砕帯の有無によらず, 背斜状撓みの上方には正断層や裂罅が伴われることが多い. 板が上に撓めば, 中立面より上に引張応力が発生する, これらの正断層や裂罅はこの引張応力によって発生したと思われる. 撓みに逆断層が伴われる場合も同様である. 逆断層の上盤寄りに正断層や裂罅が発達しやすい. このように, “第四系変状”と言っても, とくに複雑でも異様もないし, Fig. 1 ように細かく区分しても煩雑さが増すだけで, さしたるメリットは無い.

なお, 上には“背斜状”撓みについてだけ述べたが, “向斜状”撓みも勿論普通に見られる. 向斜状撓みの下方に正断層や裂罅が伴われることは, 稀である(その理由は後述).

2. 小断層の方向と応力場

東通原発敷地内で観察される小断層の大部分は逆断層である. 東北電力は, 「それらの走向がランダムで, それらから推定される最小圧縮主応力 σ_3 の軸はほぼ鉛直だが, 最大圧縮主応力 σ_1 の軸の方向がランダムにバラツクので, テクトニックな小断層ではない」とし, さらに「“膨張”による圧縮力で出来た断層である」と飛躍してしまう. 前半の意味することは, 正しくは「 σ_1 と中間主応力 σ_2 の大きさがほぼ等しいことを示唆する」であり, そのことの原因が後半の“膨張”である必然性は何もない.

まずは下の Fig. 3 で実態を見よう。形成時期が中新世に遡る“主要な断層” (Fig. 3 赤線) は北北東に卓越し、傾斜はやや急である。図の小断層 (85 本) の全てはより低角の逆断層で、2つのグループが識別できる。一つは圧倒的に卓越するもので、走向が北北東に卓越し、他の一つはずっと劣勢で、西北西に卓越する。

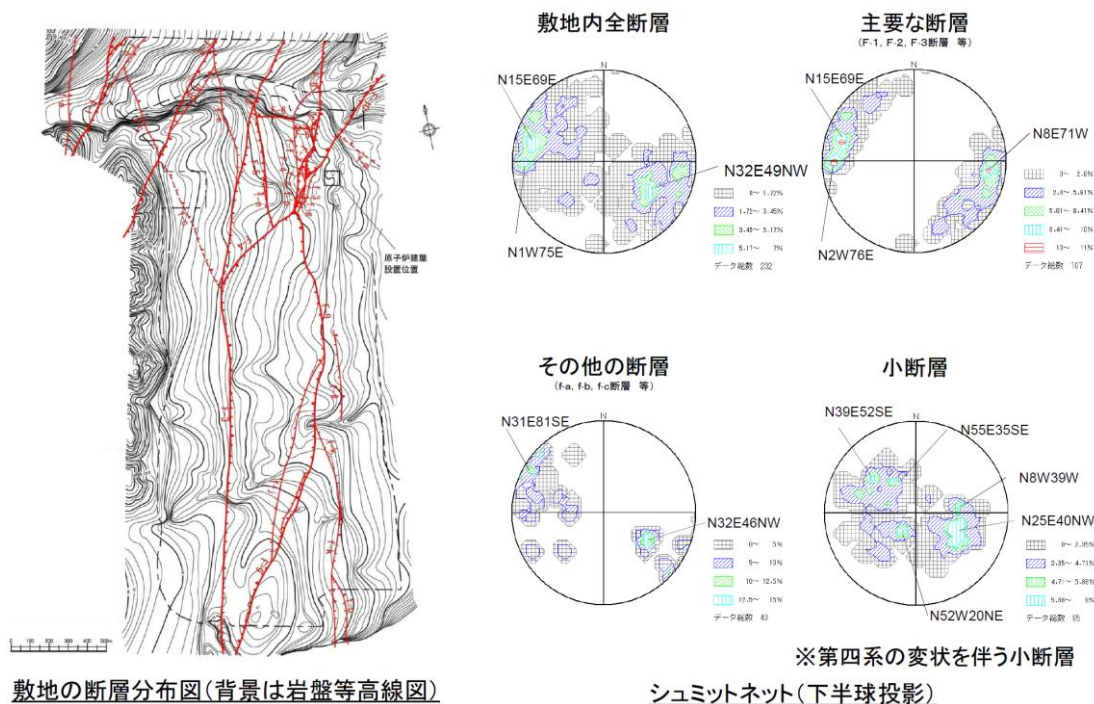


Fig. 3 東通原発敷地内で測定された断層の面のステレオネット投影図 (第9回評価会合配布資料「東通・現調 10-2-1-1」から転載)。

東北電力は、小断層が北北東方向に卓越するのは、トレンチの方向が東西方向に偏っていて、そのバイアスのためだと主張した。彼らによるバイアスの補正法が極めて不十分なので、別途大槻が行った (Fig. 4)。観察された断層が示されている Tr-20'1, Tr-20'4, Tr-28(EW), Tr-28(NS), Tr-29, Tr-30, Tr-31, Tr-32, Tr-33, Tr-34, Tr-2k'のトレンチに関して、トレンチ平面図の方向別有効長のヒストグラムを作成した。ここで言う“有効長”とはある方向 (想定した断層の走向) に直交する直線に投影したトレンチの長さのことである。個々のトレンチについて有効長を 10 度刻みで計測し、全てのトレンチに関しての和を方向別総有効長ローズダイアグラムとして表わしたのが Fig. 4a である。Fig. 4b に示した元々の断層の方向別個数分布 (これも 10 度刻み) をトレンチの総有効長で規格化し、図を見易くするようにこれに 500 を乗じて描いた補正後の方向別断層個数分布が Fig. 4c である。

補正後であっても、補正前の卓越方向の特徴が明らかに保たれていて、**方向は決してランダムではないので、小断層がテクトニックなものでないとする東北電力の推論は、自ら**

のデータで否定されている。

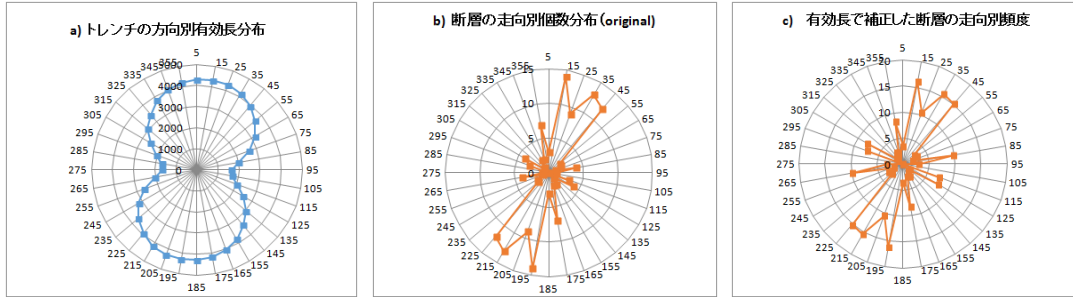


Fig. 4 a) トレンチの方向有効長分布, b) 断層の元々の走向別個数分布, c) トレンチの有効長で補正した後の断層の走向別頻度分布.

下の Fig. 5 に、多数のトレンチ内で断層面と条線が計測出来た 67 個の小断層（全て逆断層）に応力場多重逆解析法を適用した結果を示す. 4つのクラスターに対応する4種の応力場で 95%のデータを説明できるという. 4種の応力場の中の3つ（大きい☆, ○, □）の σ_1 の方向がほぼ同じなので、1つの応力場にまとめることができる. 大きい△はもう一つの応力場の σ_1 である. このように2つの応力場にまとめてさえ、説明できるのは全データの 91%に達する. 前者には走向が北北東方向で最も卓越する小逆断層群が対応し、後者に対応するのは、走向が WNW 方向でずっと劣勢の小逆断層群である.

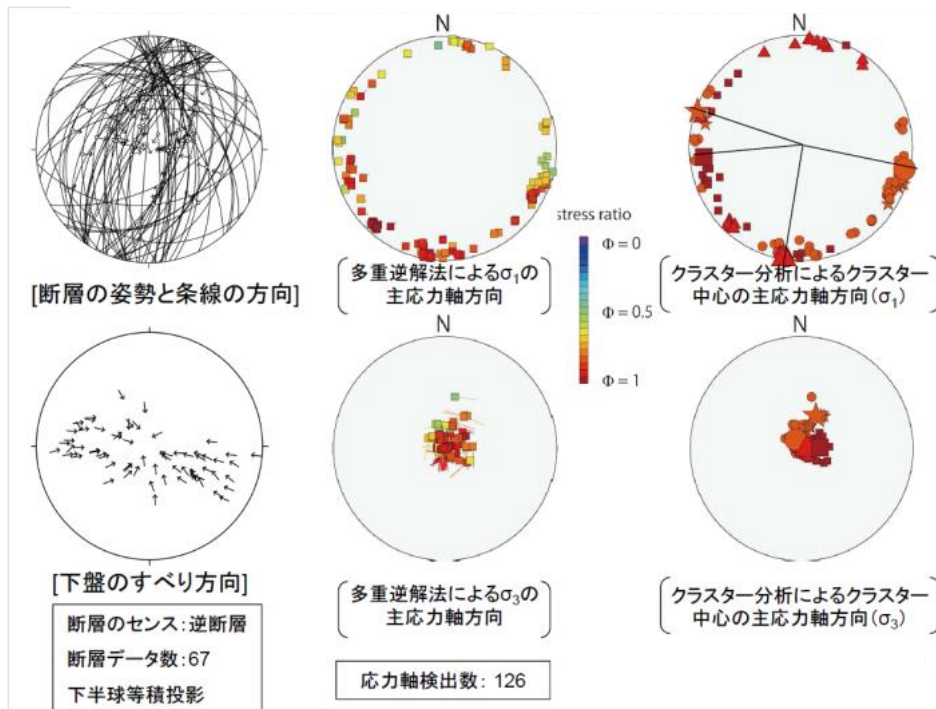


Fig. 5 小断層集団に応力場多重逆解析法を適用して得られた結果. (東通・現調 10-2-1-1 から転載).

12 万年前以降に複数の応力場が存在するようなことは、東北本州弧としては特異だが、これに関しては Ikuta et al. (2012, *JGR*, 117, B11408) による長期的な GPS 観測データ解析結果に答えがある。彼らは 1996, 2000, 2005, および 2008 年の各 1 間の水平変位速度分布を示したが、下北半島付近の水平面内での主歪の変化は、2000 年は西南西方向の圧縮、2008 年は西北西方向の弱い短縮で、定常状態に近い。ところが、1996 年の歪の変化分は、1994 年 12 月の三陸はるか沖地震 (M7.5) の余効すべりと 1996 年 1 月の余震 (M6.9) の影響を受けて中立的、2004 年は 2003 年 9 月の十勝沖地震 (M8.0) の影響で北東方向の伸びとなっている。さらに、3.11 の巨大地震を挟んだ期間では北西方向のわずかな伸びである。このように、**下北半島の地殻歪 (応力) の増分は時とともに変化する。これは下北半島のテクトニックな位置に因るのであって、“体積膨張” などをもち出す必要はないのである。**

3. 延びずにすぐ消えてしまう断層

上述したように、敷地内には多数の小逆断層がある。下の Fig. 6 はその代表的なもの s-19 で、トレンチ Tr-20'-1 に現れた。南面での断層をトレースすると、犬走り (図面の白いストライプ) あたりで、共役断層と思われる小断層と遭遇し、先には続かない。さらに、トレンチ南面での変位量は 1.7m なのだが、10m ほど離れた北面では断層が見当たらないというのである。ここで困惑し、「こんな活断層は見たこともないので、活断層ではない」、「岩盤の膨張で出来たと考えるのが合理的」などと判断したようだ。有識者の一部までもが引きずられて同様な主張をしてしまった。これもお笑いだ。以下に、この問題を吟味する。

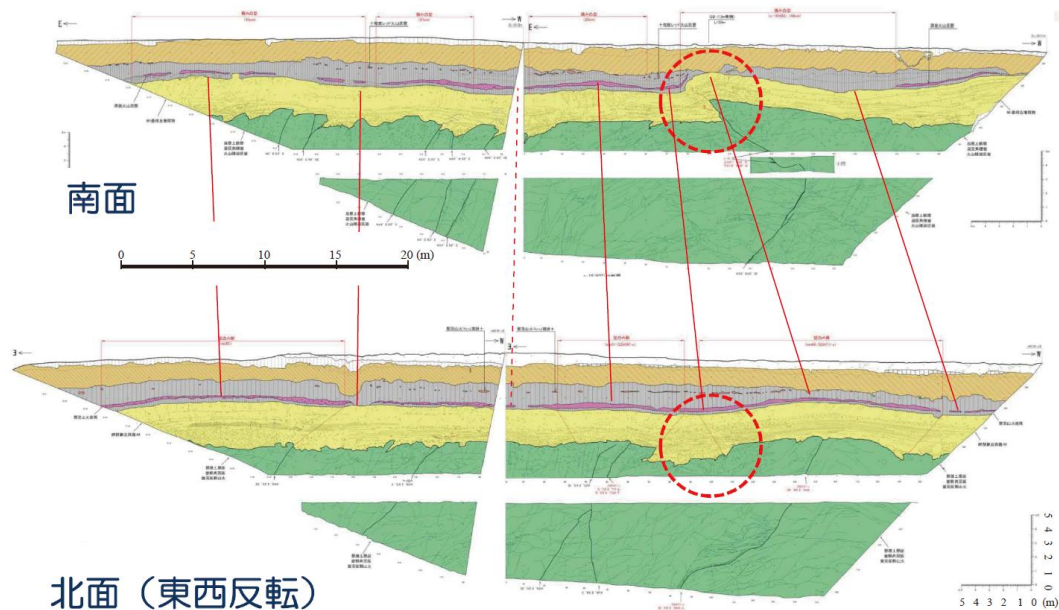


Fig. 6 トレンチ Tr-20'-1 に現れた小逆断層 s-19 と周囲の undulation (波曲変形) .

東北電力のデータを金田平太郎が加筆したもの (第 7 回評価会合の金田委員配布資料から転載) .

長さ L が 100km 程度の地表地震断層の平均変位 \bar{D} は 2~3m なので、断層近傍の歪の平均 \bar{D}/L は 10^{-5} のオーダーである。ところが上の小逆断層 s-19 の \bar{D}/L は 4 桁も大きい ($1.7/10 = 0.17$) ので、日頃地表地震断層だけを見ている人たちが戸惑うのは無理もないかもしれない。

ところで、弾性体中の円形クラックの先端が地表に突き抜けた場合には、静的応力降下を $\Delta\sigma$ 、剛性率を G とすれば、 $\bar{D} = (16/7\pi)(\Delta\sigma/G)L$ ある。第 11 回評価会合参考資料 5 に掲載されている岩盤劣化度 D と E の平均的な S 波速度と密度から G は 8×10^8 Pa と概算される。 $\Delta\sigma$ を 1MPa と仮定すれば、 L は 2000m 弱になり、 \bar{D}/L は 10^{-3} 程度となって L が 100km 程度の地震断層の場合より 2 桁も大きくなる。しかし、 G が小さな岩石は $\Delta\sigma$ も小さいだろうから、 \bar{D}/L をさらに大きくすることは難しい。これはあくまで弾性論の枠内での大雑把な議論であり、媒質が延性成分を含む場合を以下に検討する。

地質学的な断層の長さ L と変位量の最大値 D_{max} との関係に関する世界各地からのデータが、これまで数人の研究者によってコンパイルされた。それらの中の Kim and Sanderson (2005, *Earth-Science Review*, 68, 317) による結果を下の Fig. 7 に示す。この図を参照すれば、 D_{max}/L が 10^{-2} 程度の断層はごく普通であるし、房総半島や日南海岸の小断層も同様である。 D_{max} が 1m 程度で L が 10m (すなわち 5m 離れただけで 1m の D が 0 になる) というような断層も、別に珍しいものではないことが分かるだろう。だから、「こんな断層は見たこともないので、活断層ではない」というのは、その人が見たことがないというだけのことである。もっとも、Fig. 7 の断層はいずれも地質時代の“活断層”なのだが・・・

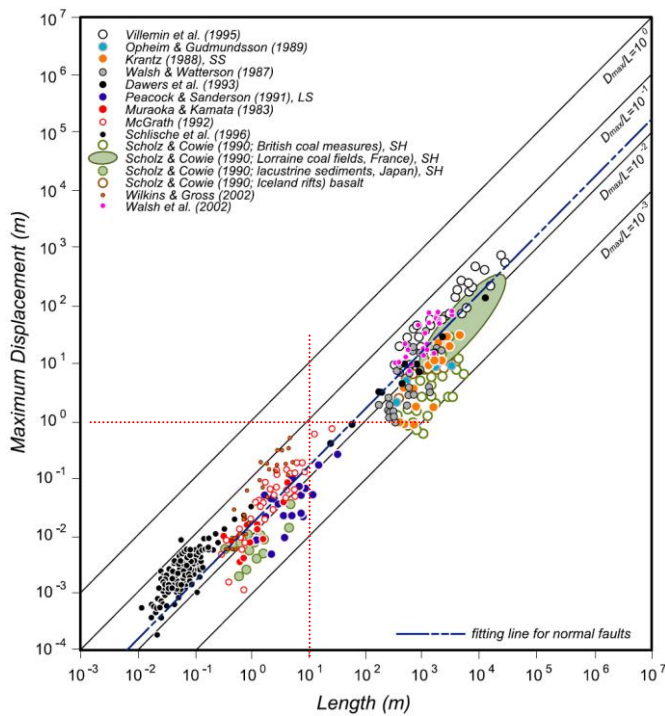


Fig. 7 地質学的な正断層の長さ と最大変位量 との関係に関する統計。

Kim and Sanderson (2005, *Earth-Science Review*, 68, 317) から転載。

L が100km前後の地表地震断層の \bar{D}/L が 10^{-5} のオーダーで、Fig. 7の地質学的断層の \bar{D}/L が $10^{-1\sim 3}$ のオーダーである。この大きな差異を考えるに際しては、前者が地震発生層（～上部地殻本体）で発生する断層であるのに対し、Fig. 7の小さな断層に関するデータは、堆積岩中に発達した小断層から得られていることに注意を要する。すなわち、地震発生層がより弾性的であるのに対し、堆積岩はずっと延性的なのである。

岩石物性試験の世界では、破壊に至るまでの永久歪が“延性度”と定義され、延性度が3%以下なら“脆性”，3~5%なら“漸移的”，5%以上なら“延性的”などと便宜的に呼ばれている。ここで、鮮新世の凝灰質細粒砂岩（竜ノ口層）の物性の一例を紹介しておく。水に飽和させたこの岩石は、封圧4~16MPaでは、降伏応力が常にほぼ9MPaで、歪硬化係数がほぼゼロの完全塑性体（St. Venant物体）のような挙動を示すのである（大槻・永広・北村，1974，地質学雑誌，80，391）。すなわち、降伏点を過ぎても、同じ载荷応力で延々と（この実験の場合は8%の軸歪を越えても）破壊せずに変形する。このような堆積岩の粘性率を測定した例も紹介しておこう。植村（1982，月刊地球，4，31）によれば、鮮新統西山層の泥岩の常温下での粘性率は $10^{13}\sim 10^{14}$ Pasである。これは地殻本体より数桁小さい。

粘性成分が大きければ、変形しつつ応力緩和が起こるので、破壊に至るまでの永久歪である延性度は格段と大きくなり得る。このことから分かるように、東通の劣化岩盤が延性的であれば、「短い距離ですぐに消える断層」，「 10^{-1} オーダーのひずみで破壊する断層」は異様ではないし、根拠無しに“膨張”などにすぎる必要もない。

では、東通原発敷地の劣化岩盤は本当に延性的なのか。再度 Fig. 6 を参照して欲しい。トレンチの南面に現れた s-19 のきれいな小逆断層は、北面では無くなって、緩い背斜に変わっている（同様の典型例は Tr-27 の F-3，Tr-8 の f-c，Tr-32(E-W)の f-k①と②などに見られる）。これらを基準にして第四系を見れば、波長10数mから20m程度で緩くうねっていて、個々の背斜と向斜が南北両壁面に対応していることが分かる。すなわち、北北東方向の軸を持った褶曲である。次に第四系と基盤との境界に注目すれば、基盤岩には小逆断層が発達して境界はノコギリの刃状にギザギザになっている所もあるが、全体として第四系の褶曲と調和的に波打っている。すなわち、基盤岩もマクロには延性変形をしているのである。岩盤中の逆断層がこのような褶曲や撓みと相伴って出現していることは、断層も延性的である証拠である。

小逆断層集団のサイズ分布の特徴という全く別の角度から、劣化岩盤が延性的であるもう一つの証拠を示そう。第11回評価委会合配布資料 東通・現調 12-2 に敷地内断層の規模（変位の鉛直成分）別個数分布のデータがある（この部分で述べられている東北電力の主張は正しくないが、ここでは触れない）。下の Fig. 8 にはそのデータ用いて大槻が作った鉛直変位と断層の積算個数との関係を示してある（青色の菱形）。小さいサイズ領域では cut-off が、大きいサイズ領域では roll-off が認められるが（白抜きの青い菱形），それらを除くと全体としてべき分布（フラクタル分布）を示している。そのフラクタル次元は1.6である。他地域の新第三系中のテクトニックな小断層集団（例えば、Otsuki, 1998, *Geophys.*

Res. Lett., 25, 671) と比較してこの値は大きめで、延性的な断層集団の特徴である。ここでも東通の小断層が延性的であることが示された。

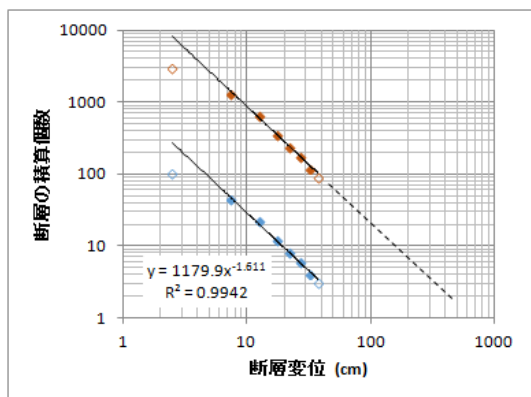


Fig. 8 東通敷地内小逆断層の規模（鉛直変位成分）と断層の積算個数との関係（青い菱形）。

橙色の菱形は頻度を 30 倍したとき。

ここで、以下の事を若干付け加えておく。断層が延性的ということは、破壊エネルギーが大きいということである。そのため、断層の成長に伴って媒質から解放される弾性歪エネルギーのうち、破壊エネルギーに消費される割合が大きくなり、その分波動エネルギーに割り当てられる残余が少なくなるので、地震を起こしにくい。断層が地震を起こすか安定すべり（クリープ）をするかは、摩擦構成則に従った吟味を別途行わなければならない。

(注) この項に関しては、大槻からのコメント（その4）、（その7）、および（番外）で扱っている。

4. 根なしの断層

トレンチ Tr-20 での小逆断層 s-19 は変位量が 1.7m もあるのに、地下には 10m も続かない。Tr-29 での s-14 も変位が 1.5m もあるのに、地下 18m 程度までしか続かない。東北電力や有識者の一部は、「これらは下に続かない断層なので活断層ではない」とか「あるいはテクトニックな断層ではない」と判断してしまう。改めて説明するまでもないが、全くの間違いである。

Fig. 8 を再度見て欲しい。断層のサイズ（変位量）分布はべき関数に従っていて、通常のテクトニックな断層集団と何ら変わらない。べき分布なので、サイズの小さな断層ほど数が圧倒的に多くなる。トレンチの総面積が原発敷地の 30 倍と仮定すれば、Fig. 8 の橙色の菱形のトレンドになって、変位量が 1m 程度の断層なら 20 本、10cm と小さければ 1000 本にもなるといった具合である。したがって、観察者は圧倒的に高頻度で小さな断層に遭遇することになる。それらの断層は小さいのだから、地下に延々と延びることなどない。変位量が 1m 程度であっても、断層が延性的なのだから、10m とか 100m 先では消失してしまっても何の不思議も無いことは、既に解説したとおりである。したがって、「根が無い」

ことも当然であって，“膨張”などという見当違いのことを持ち出してはいけない。

地震発生層本体から上方に延びてきた断層がちょっと地表に顔を出してもよい。しかし、そのような大き目の断層が存在する確率は格段と低い上（これもべき分布だが、Fig. 8 とは別のもの）、延性的な地表の堆積岩類は断層の進展を妨げてしまうので、観察者がそのような断層に遭遇するチャンスはますます低くなる。

東北電力は「断層が小さいからテクトニックではない」などとも主張する。これも笑止である。例えばマグニチュード 0 の微小地震は無数に観測されているが、震源断層の長さは 10m 程度である。このような地震はテクトニックなものではないとでもいうのだろうか！ 地震のサイズ分布（ゲーテンベルグ・リヒター則）や Fig. 8 のような地質断層のサイズ分布を見れば、東北電力の主張の誤りは言うまでもない。

そもそも断層は応力が作用して初めて発生するわけだが、応力には“テクトニックな色”とか“岩盤膨張の色”とか色が付いているわけではないので、断層を見ただけでは、テクトニック/非テクトニックの区別は原理的に不可能である。区別出来るとすれば、応力分布の一様性とか広がりの特徴に注目することが有効である。堆積岩中の小断層を用いて地質学的過去の応力場を復元した事例は多数あるが、島弧規模で一定した応力場が復元されているので、これらの小断層はテクトニックである。中田ほか（1976, 東北地理, 28, 111）は、仙台の長町一利府断層周辺の小断層を仙台市街地近傍で 130 本余り測定し（断層条線は 26 本、段丘堆積層を切るものも含まれる）、これらから復元される主応力軸の配置が長町一利府断層とこれに付随する活断層から推定される主応力軸配置、および発震機構解から求められた主応力軸配置と大変良く一致することを示した。このことは、このような堆積岩中に発達する地表の小さな断層であってもテクトニックな断層で、活断層であることを示している。東通原発敷地内の圧倒的に多数の小逆断層群から復元された応力場も、発震機構解から求められている応力場と全く調和的であり、これらの小断層もテクトニックなものである。

(注) この項に関しては、大槻からのコメント（その4）、（その7）、および（番外）で扱っている。

5. 「第四系中の断層や裂罅の下方延長の基盤岩に 断層の本体が見当たらないことがある」

Fig. 9 を参照されたい。基盤岩上面と洞爺火山灰（赤線）は中央から東（右方）に向ってほぼ調和的に撓み下がってる。この撓み下がり埋め合わせているのが主に F2 扇状地堆積物であり、F3 扇状地堆積物の上限はほとんどこの撓みには参加してはず、ほぼ水平である。すなわち、撓みは主に F2 扇状地堆積物の堆積中に発生したのである。

M₁ 面段丘堆積物に注目して図の左から右へと目を移せば、層理が水平から右方に傾きはじめる付近から急立した正断層・裂罅が出現し始め、傾斜が増加している間は存在し続けるが、傾斜が減少し始めると同時に無くなる。これらの正断層・裂罅は M₁ 層の上半部に限って発達していて、下方に向って消滅してしまうので、この項の題名にあるように「断層

や裂罅の下方延長の基盤岩に断層の本体が見当たらない」のである。このような現象は何も不思議なことはない。

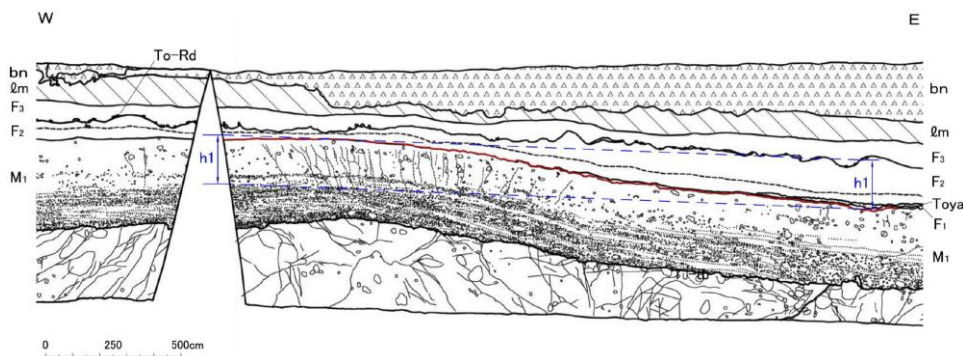


Fig. 9 Tr-20'4 トレンチ南面・T-8 (東西反転) のスケッチ (第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-5) .
 マーカー (層理面) の x (水平軸) に関する 2 階微分が負の所で、かつ中立面の外側に裂罅 (開口性割れ目) や正断層が出来やすい。

ここで弾性板の曲げを考えよう。板の真中に $y = 0$ の座標を設け上方を正とする。横方向に x 座標を設け、右方向を正とする。板を曲げたときに発生する x 方向の法線歪 ϵ_{xx} は $\epsilon_{xx} = -y(d^2w/dx^2)$ である。ただし、 ϵ_{xx} に関しては伸びが正であり、 w は曲げによる y 方向の変位である。上の M_1 層を弾性板と仮定すれば (乱暴な仮定だが・・・), 右側が下方に撓み下がるのだから、 w は負であり、 x の正の方向に向って撓みが増せば d^2w/dx^2 が負になり、 y の正の方向 (M_1 層の上部の方向) に向って ϵ_{xx} が増す (伸び歪が大きくなる)。 $y = 0$ では $\epsilon_{xx} = 0$ であり (中立面), $y < 0$ では $\epsilon_{xx} < 0$ (短縮) である。以上のように、**中立面より上 (M_1 層の上半部) では開口割目 (裂罅) か正断層が出来やすく**, それより下 (M_1 層の下半部) では逆断層が出来やすい。一般に、引っ張り強度は圧縮強度よりずっと小さいので、 M_1 層の上半部に裂罅や正断層は出来るが、 M_1 面段丘堆積物の下半部にはいずれの断層も出来にくい。これが裂罅や正断層の成因とそれらが基盤まで延びない理由である。

標記の問題は以上のように簡単なことであって、数十年も前に解き明かされている。被覆第四系に発達する裂罅や正断層が基盤まで延びないことを理由に、これらが劣化した岩盤の膨張で形成された非テクトニックな断層だなどという主張は、全般的な外れなのである。

なお、少し長いトレンチで観察すれば、撓みは波長が 15~20m 程度で繰り返すことが分かるので、波曲 (undulation) と言うべきである。上に凸の波曲にはしばしば逆断層が伴われ、互いに平行のようなので、**波曲の成因は座屈褶曲**であると思われる。逆断層が伴われると褶曲は Fig. 10 のように非対称になる。

以上に述べたような視点を整えた上で、第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-1~6 などを参照して全ての“第四系変状”を検討すれば、それらの成因を無理なく理解できよう。

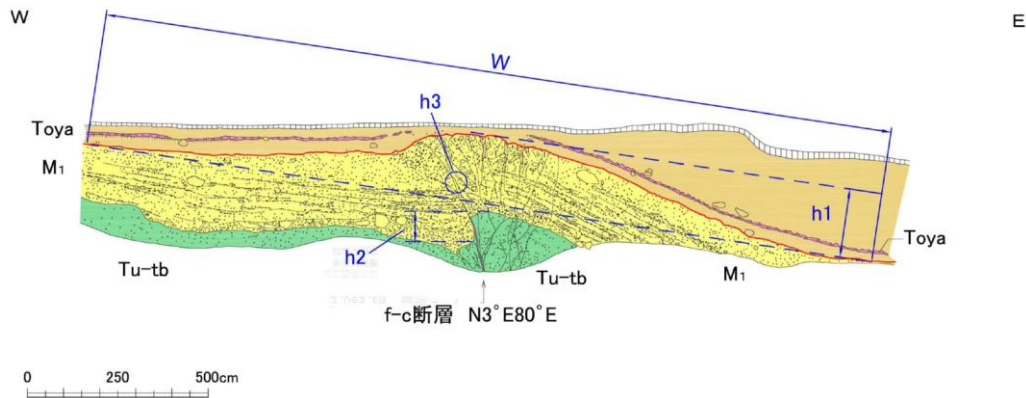


Fig. 10 国道 338 号沿いの露頭南面 f-c 断層のスケッチ (東西反転)
(第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-3) .

6. 地下深部での破砕帯の固結状況

“主要断層”は中新世に出来た大き目の正断層で、現在もウジウジと動いていると疑われている。東北電力はこれらの断層めがけてボーリング孔を掘削し、深さ 300m 付近までの破砕帯の性状を調べた。その結果を下の Fig. 11 に示す。

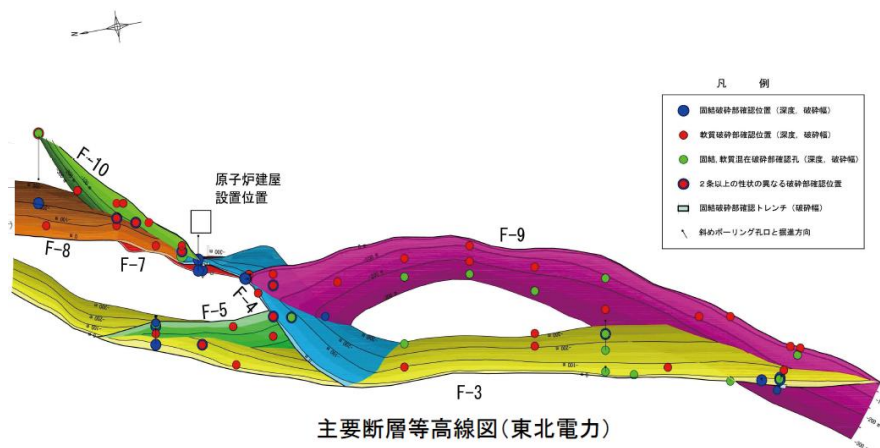


Fig. 11 “主要断層”の破砕帯をボーリングで調べた地下での性状。

調査の結果は、第 6 回評価会合配布資料 東通・現調 7-2, 第 7 回評価会合配布資料 東通・現調 8-1, 第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1, 第 9 回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-2 などに掲載されている。図中の青い○は固結破砕帯、赤い○は軟質破砕帯、黄緑の○は固結と軟質が混在した破砕帯、赤く太い○は性状の異なる複数の破砕帯が確認された所である。断層 F-3, F-8, F-9, F-10 などは、調査ポイントの多くが軟質破砕帯か固結/軟質混在破砕帯である。断層 F-4 と F-5 は調査ポイントの半数ほどが固結破砕帯で、残りは軟質破砕帯か固結/軟質混在破砕帯である。固結破砕帯は heal されていて、放射年代が約 10Ma のセピオライトが伴われるという。

このような調査結果から、固結破碎帯が1ヶ所でもあれば、その断層は heal された後に全く活動しなかったとみなし、全ての断層が第四紀に活動したことはなかったと東北電力は解釈する。これは極端に偏った解釈である。軟質破碎はより新しい断層運動の産物で、固結破碎部は step over などでは破碎され残ったのだという解釈も可能だからだ。

大槻からのコメント（番外）では、「東北電力株式会社 東通原子力発電所 敷地内断層の活動性等の評価に係る追加地質調査報告書 添付資料 1～9 平成 26 年 1 月 17 日」の中の「添付資料-5 断層の破碎部固結状況，地下深部への連続性」の添 5-1～99 に掲載されているデータを解析し、表 1 の結果を得ている。

表 1 固結，軟質，および両者混在の断層破碎帯に含まれる粘土鉱物の出現事例個数。

	固結	混在	軟質
セピオライト	14	6	1
パリゴルスサイト	0	4	2
クリストバライト	2	2	0
モンモリロナイト	1	15	4
未同定	5	2	2

表 1 は次の事を示唆する。固結破碎帯はセピオライトの沈殿を伴って heal されている。セピオライトは Mg を含む粘土鉱物で、塩基性火山の変質帯によく認められることから、healing は泊層の火山活動に伴われる熱水作用によると推定される。Healing の後、固結破碎帯は再度破碎を被り、固結・軟質が混在する破碎帯、あるいは軟質の破碎帯になった。モンモリロナイトが伴われることがこの新たな破碎の特徴で、セピオライトは固結破碎帯の破碎され残しである。ボーリングコア試料の写真およびソフト X 線画像によれば、固結/軟質混在型破碎帯と軟質破碎帯の多くに**剪断変形構造**が認められる。これは、新期破碎が断層運動によることの証拠である。モンモリロナイトを伴う軟質破碎帯は、地表で観察される“第四系変状”を示す断層の特徴でもある。したがって、**地下と地表の軟質破碎帯と固結/軟質混在型破碎帯は、新期（おそらくは第四紀）に形成、あるいは再活動したと考えるのが妥当である。**

東北電力は、「破碎帯の固結/軟質の違いは熱水変質の程度、断層破碎部の透水性の違いによる」しているが、珍妙な解釈である。透水性が異なれば異なった粘土鉱物種が生成するなどという研究結果には接したことがない。「熱水変質の程度」とは変質の grade のことか、変質鉱物の量や変質の空間的広がりのことか。いずれにしてもそれらによって固結/軟質が決まるとも思えない。何せ、固結/軟質は混在しているのだから。

断層すべりは常に同じ断層面上で起こるとは限らない。例えば、1999 年台湾集々地震の際に活動した車龍埔断層に関しては、浅いパイロットボーリングでは深度 150～450m の間に 10 数枚の破碎帯が確認されたが、その延長部で掘削した深層ボーリングでは 1136～

1314m にわずか4本の断層帯が認められにすぎない (例えば, Otsuki et al., 2005, *Island Arcs*, **14**, 12; Otsuki et al., 2009, *Tectonophysics*, **469**, 13). また, 断層すべりはジョグで step over することが稀ではない. したがって, 新期の断層運動が常に古い固結した破碎帯を利用するとは限らないので, ボーリングコア試料に一か所でも固結破碎帯が認められたからといって断層全体が新期に活動しなかったとは言えない.

上に述べたように, 地下と地表の軟質破碎帯と固結・軟質混在型破碎帯は, とともに第四紀に形成されたと考えるのが妥当であり, Fig. 11 から, 新期に活動しなかった断層は, F-7 だけらしいことが分かる.

7. F-3 断層の“第四系変状”と横ずれ変位成分

F-3 断層は敷地西部を北北東-南南西に延びる“主要断層”の代表格で, 中新世に形成された東側落ちの正断層である. 地表とボーリングで確認された断層破碎帯は, Fig. 11 に示されているように, 軟質か固結/軟質混在型であり, 第四紀で再活動した可能性が高い. 観察された“第四系変状”の性状を Fig. 12 に, 鉛直変位量を Fig. 13 に示す. 後に掘削された Tr-28 トレンチの壁面スケッチを Fig. 14 に示す.

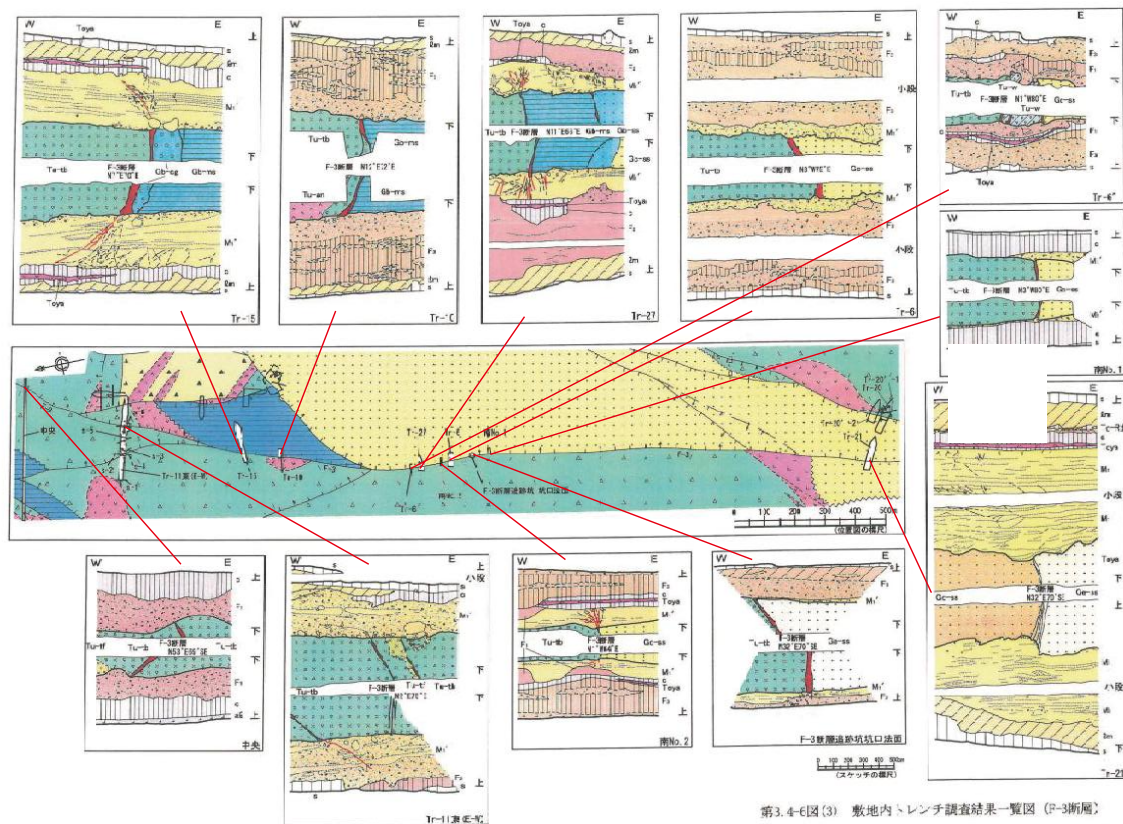


Fig. 12 F-3 断層沿いの“第四系”変状. 第1回評価会合配布資料 参考資料2 から転載.

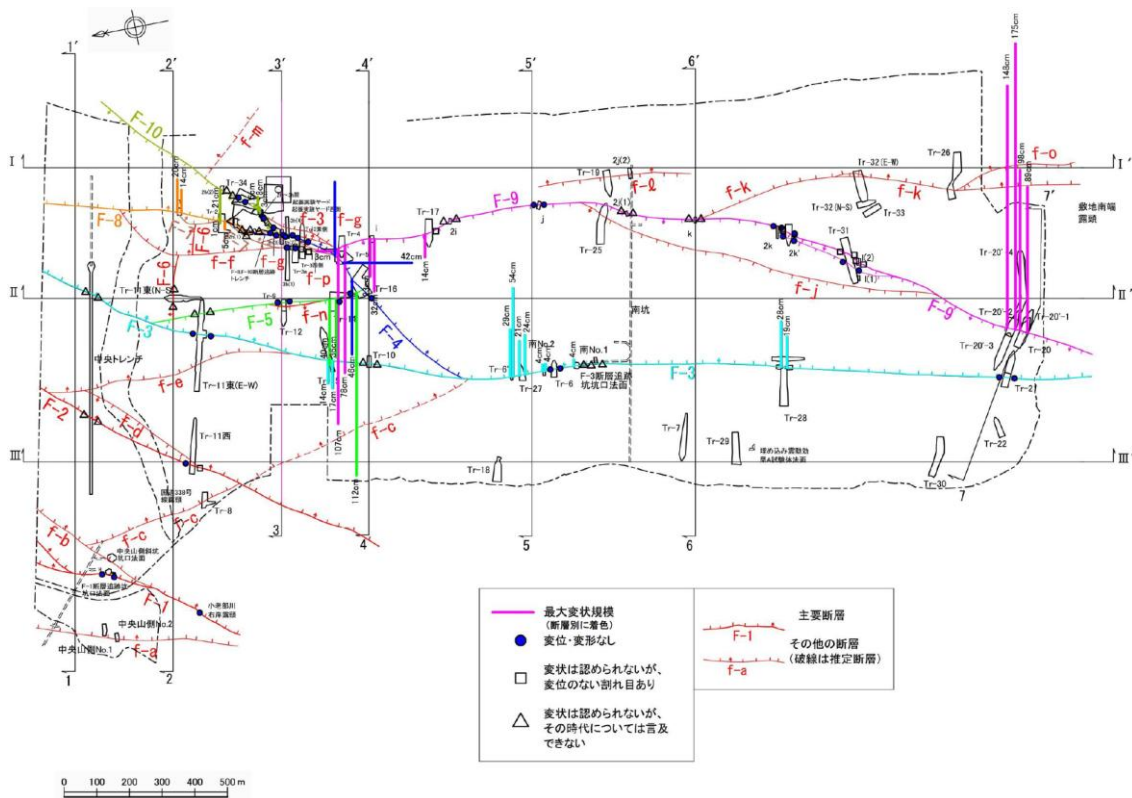


Fig. 13 主要な断層沿いの第四系変状の鉛直変位量.

第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-2, p.28 から転載.

- ・敷地北端の中央トレンチの F-3 には新期活動が無さそうだ.
- ・Tr-11 トレンチも同様だが, F-3 の 10m 西には 32cm W-up の逆断層 s-6 (N3°W42°W) があり, 100~150cm W-up の撓曲が伴われている. このトレンチにはその他にも s-1 逆断層 (N30°E37°W, 35cm W-up), s-2 逆断層 (N22°E75°E, 9cm E-up), s-3 逆断層 (N38°W60°NE, 9cm E-up), s-4 逆断層 (N20°E40°W, 23cm W-up) などが発達している. すなわち, Tr-11 トレンチ付近では“第四系変状”の活動は F-3 断層を使わず, 新たな W-up の撓曲を伴う逆断層が形成された.
- ・Tr-15 トレンチでの F-3 に関しては, 基盤上面に 17~40cm E-up の変位があり, M1'面段丘堆積物中に延びる小逆断層の鉛直変位は 14cm である (この解釈は, Fig. 13 の東北電力の解釈とは異なる).
- ・Tr-10 トレンチでは“第四系変状”は認められない.
- ・Tr-6' トレンチでは F-3 断層の破碎帯直上の F1 扇状地堆積物と c 層 (洞爺火山灰と F3 扇状地堆積物との間の層) が幅 570cm にわたって最大 54cm 上に凸に撓んでいる.
- ・Tr-27 トレンチでの F-3 は 15cm E-up の逆断層で, 破碎帯を覆う M1'面段丘堆積物を上に 21cm 撓ませ, 鉛直変位 4~5cm の小逆断層を伴い, 断層粘土の注入が認められる.
- ・南 No.2 トレンチの F-3 では, 基盤から M1'層中に延びる 4cm E-up の逆断層と裂隙が発

達している。

- Tr-6 トレンチでは変状が認められない。
- F-3 断層追跡坑坑口法面では、19cm E-up の逆断層（解釈 Fig. 13 とは異なる）と粘土注入がある。
- 南 No.1 トレンチでは変動が認められない。
- Tr-28 トレンチでの F-3 断層は 40cm E-up の逆断層で（変位量の見積もりが Fig. 13 と異なる）、M₁ 層に小逆断層（~6cm）と裂隙、および上盤側の 28cm の撓みを伴う（Fig. 14）。F-3 断層の 5m 西にも 50cm E-up のより低角な逆断層があって、M₁ 層に小逆断層と裂隙を伴う。
- Tr-21 トレンチには“第四系変状”が認められない。

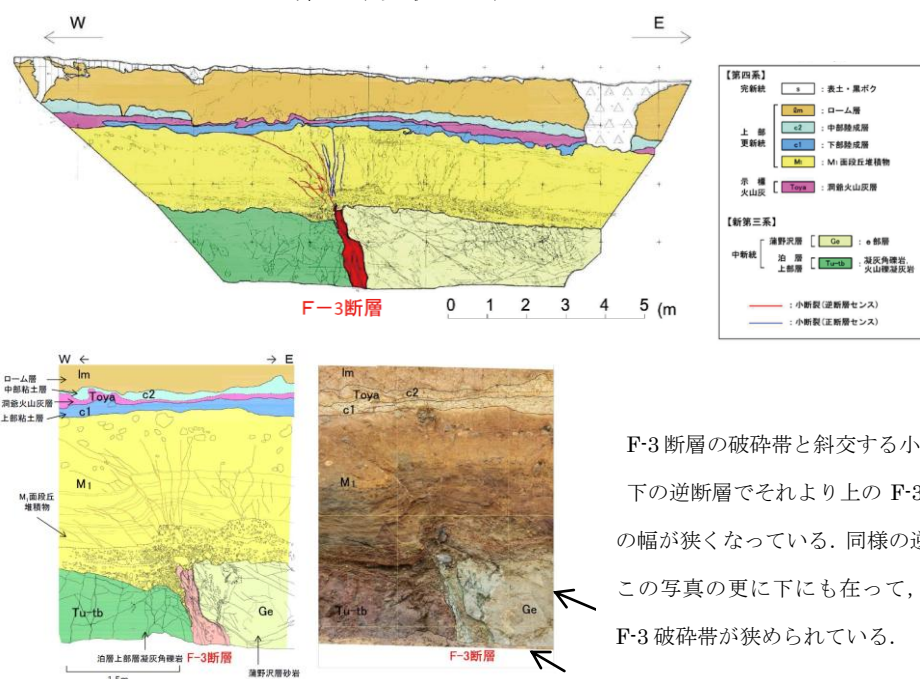


Fig. 14 Tr-28 トレンチの F-3 断層. 第 6 回評価会合配布資料 東通・現調 7-2 から転載.

有識者会合は、F-3 断層の Fig. 14 のような構造が“花卉構造”に似ているので横ずれ断層の可能性が強い旨、主張した。東北電力は Tr-28 トレンチで水平掘削を行った。その結果、Fig. 15 のようにリーデルシア様の右雁行配列する割目パターンが確認されたので、左横ずれ成分が含まれているようである。しかし、破断した礫の食い違い、断層条線のレイク等から、縦ずれ成分が主体であることが明確になった。

形はメカニズムのヒントにはなるが、証明にはならないことを示すよい例である。同様に、被覆層中のリーデルシア様の雁行配列は、断層の鉛直変位が走向方向に勾配を持つ場合にも現れる。電中研はスケールモデル実験から Fig. 14 や Fig. 15 のような構造を再現して、メカニズムに迫ろうとしたが、相似率を満足しないスケールモデル実験の実証性の評価には注意を要する。

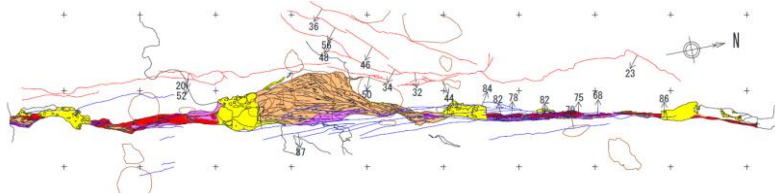


Fig. 15 Tr-28 トレンチ水平掘削における F-3 断層の水平面スケッチ.

第 9 回評価会合「配布資料 東通・現調 10-2-1-1 より転載.

Fig. 14 に示されている F-3 の断層面に沿って M_1 面段丘堆積物中の礫が深さ 50cm ほど落ち込んでいる現象も注目された (Fig. 16). この“落ち込み礫”の成因に関して, 有識者の一部は断層運動でもみ込まれた可能性を指摘し, 東北電力は断層面に沿って浸食された深い溝に地表から落ち込んだと主張した. しかし, 未だ決着を見ていない. F-3 の破碎帯 (Fig. 14 の左図で肉色に塗色された部分) は軟質で, 図から分かるようにオーバーハングして傾斜 62 度である. M_1 層は礫質な海岸の堆積物だが, 断層粘土が剥がれ落ちずに, 破碎帯に沿って深く溝状に浸食できるであろうか.



Fig. 16 トレンチ Tr-28 での F-3 断層. M_1 層の円礫が破碎帯に沿って落ち込んでいる.

第 2 回評価会合 有識者説明資料から転載. 左の写真は金田委員, 右の図は佐藤委員による撮影.

両者とも触れていないもう一つの可能性があるので, 下にそれを説明する. 地震性ラプチャーが通過する際に *plane-normal vibration* が起き, 割れ目がバフバフと開閉する (摩擦学では“Schallamach wave”として古くから知られている). この現象は 1976 年 Guatemala 地震 (Ms7.5) で観察され, 実験的にも確かめられた (Brune et al., 1993, *Tectonophysics*, 218, 59). *Plane-normal vibration* は神戸地震の際の野島断層でもあったようで, 周期約 0.6 秒で断層面が開閉する間に地表の粗粒な砂粒が落ち込んだ (Monzawa & Otsuki, 2003, *Tectonophysics*, 367, 127). Fig. 15 に示した“落ち込み礫”もこのような現象かもしれない. “落ち込み礫”は, 大飯原発敷地内の台場浜台場浜トレンチ東端の断層破碎帯でも見られ, 活断層の地震性/非地震性を判定するときに役立つので重要である. 今後吟

味することが望まれる。

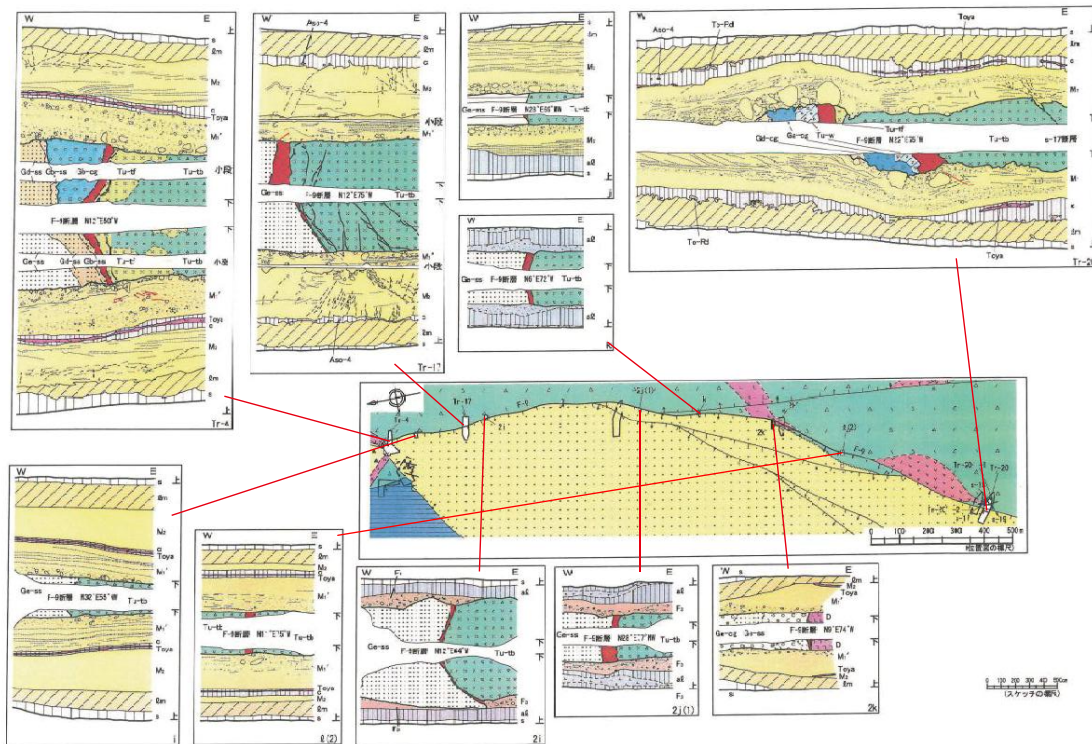
F-3 断層に沿った観察結果を総合すれば、

- ①中央, Tr-10, Tr-11, Tr-10, Tr-6, 南 No.1, および南端の Tr-21 トレンチでは“第四系変状”は認められない。
- ②Tr-15, Tr-6', Tr-27, 南 No.2 トレンチ, F-3 断層追跡坑坑口法面では, 20cm 未満の E-up の撓曲, 断層変位が認められ, “tectonic inversion”と言ってよい。それらには断層破碎帯の直上だけの撓みや軟質断層粘土の注入が伴われている。
- ③ Tr-28 トレンチでの F-3 断層は, F-3 断層の中では最も明瞭な tectonic inversion 性の“第四系変状”で, 撓曲による変形成分も含めると鉛直変位量は 100cm ほどになる。しかし, 近傍に観察地点が無いので, 活動した部分の断層長は 1200m を越えないとしか分からない。
- ④Tr-11 トレンチは興味深い。ここでの F-3 断層本体は動いていない。しかし, その西側近傍に 6 本の小逆断層が有って, 撓曲を含めて西側が総計 2m ほど上昇している。このことは, tectonic inversion が必ずしも“第四系変状”の主役でないことを示唆する。
- ⑤F-3 断層全体として最も大きな特徴は, F-3 の部分毎に inversion, 破碎帯の上に凸の撓みと軟質断層粘土の注入, F-3 を利用しない新たな小断層形成など, 多様な変形様式で小規模に動いていることである。

8. F-9 断層の“第四紀変状”

F-9 断層は F-3 と並ぶ敷地内“主要断層”の代表格である。西落ちの正断層として中新世に形成され, F-3 断層との間は地溝となっている。Fig. 11 に示されているように, ボーリングコアで確認された断層破碎帯の性状は, ほとんどが軟質か固結・軟質混在型であり, 中新世の後, おそらくは第四紀に再活動した可能性が高い。Fig. 17 にトレンチ毎の“第四系変状”のスケッチを示す。

- ・Tr-4 トレンチでの F-9 断層には 6cm W-up の逆断層変位が認められ, その上方延長の M₁' 面段丘堆積物中に変位 2cm の小断層が認められる。W-up の撓みが顕著で鉛直変位は 78~107cm に達する。M₁' から M₂ までの第四系がこの変形に参加している
- ・i トレンチでの F-9 も 23~32cm W-up の撓曲を成している。M₂ 面段丘堆積物の一部のこの変形に参加している。
- ・Tr-17 トレンチの北面では 14cm W-up の変位が認められ, 撓曲はほとんど認められない。M₁' 層中に 2 cm W-up (?) の小断層が認められる。このトレンチの南面での F-9 断層に変位はないが, 15cm 程度の W-up の撓曲がある。M₁' と M₂ 層中に裂罅が認められる。
- ・2i トレンチでは基盤を覆う第四系は十和田レッド軽石層 (To-Rd) より若い。トレンチ北面では被覆第四系に変形が認められない。南面では 60cm W-up の段差が明瞭で, 基盤を直接覆う F₃ 層がこの段差を埋積・平坦化している。この段差を W-up の逆断層変位と見ることもしできるかもしれない。



第3-4-4区(5) 敷地内トレンチ調査結果一覧図 (F-9断層)

Fig. 17 F-9断層に層“第四系変状”. 第1回評価会合配布資料 参考資料2 から転載.

- j トレンチでは基盤を直接覆う M₂層に変位を与えていない.
- 2j トレンチの北壁では基盤を直接覆う F₃層に変位を与えていないが、南壁では F₃層に 40cm 程度の W-up の撓曲あるようにも見える.
- k トレンチでは、基盤を直接覆う第四系が al 層で To-Rd 軽石層より若いためか、変動が認められない.
- 2k トレンチでは、基盤を直接覆うのが M₁'層だが、それでも“第四系変動”は認められない.
- 2k' トレンチは 2k トレンチのわずか 30m 南にある. ここでの F-9 断層は A, B 2つの断層から成るが、基盤を直接覆う M₁'層に断層変位は認められない. しかし、南北両面とも撓曲によって 30cm ほど西が上昇しているとみなしてもよいかもしれない. このトレンチの東端で F-9 から 20m ほど東にある 2k' s-1 逆断層 (N8°W48°E, 42cm E-up) に注目すべきである. これについては後に再度言及する.
- Tr-31 トレンチに関するデータは Fig. 17 には載っていないので、第9回評価会合参考資料 2-2 及び同 2-6 を参照する. F-9 断層 (この地点では断層の両側が泊層なので、図の断層が真の F-9 断層であるか不明) を覆う M₁'層に変位を与えているようには見えないが、その延長部に小逆断層らしきものがあるが、変位は無いという. 撓曲主体の“F-9 派生断層”なるものが F-9 の近傍にあり、断層面は N53°E58°N で、変位量は 30cm W-up である.

- このトレンチの東端には 230cm ほどの隆起があるが、後に詳しく述べる。
- ・ $l(2)$ トレンチでの F-9 は M1 層を変位させていない。
 - ・ Tr-20' トレンチのシリーズは 300m 余りの長さで、F-9 の全体像等を理解するのに有用である (Fig. 18)。

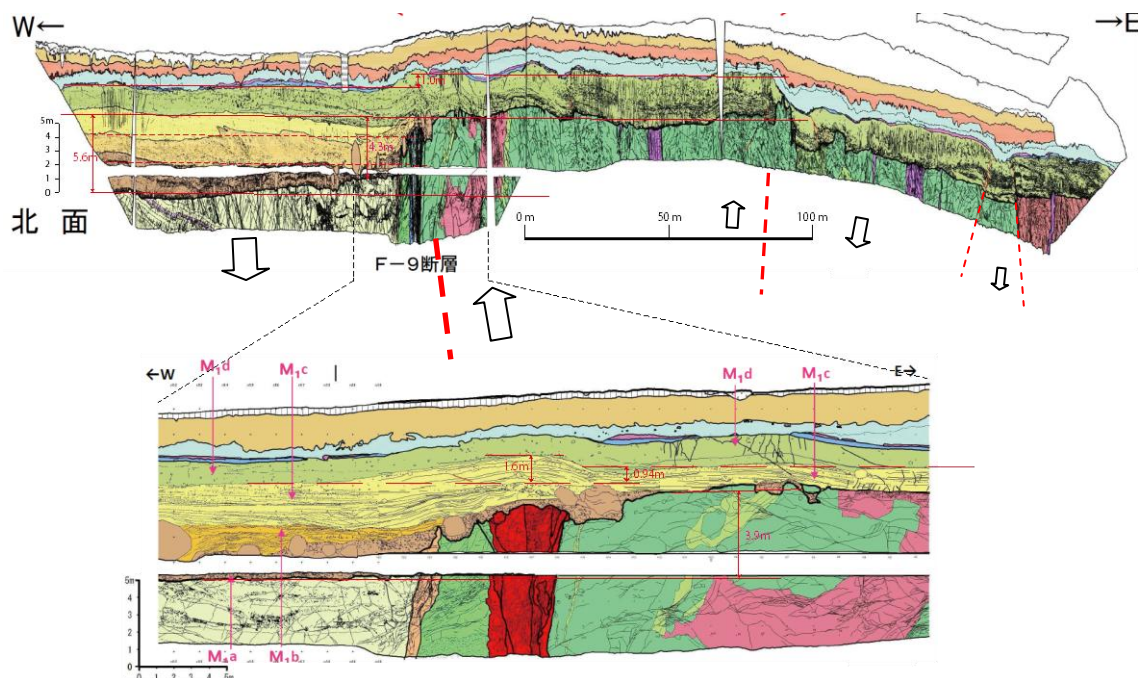


Fig. 18 上の図；トレンチ Tr-20'・3~20'・2~20'・4 のスケッチ (第 9 回評価会合配布資料 東通・10-2-2)。横方向を著しく短縮している事に注意。下の図：上の図の一部 (Tr-20'2 トレンチ) を拡大した図 (第 11 回評価会合 東通・現調 12-2-1)。水平の白のストライプは犬走り。

F-9 断層の東側の地形的・地質構造的な高まりの成因に関しては、東北電力と有識者会合との間で主要な議題の一つになった。詳細な吟味は後にして、実態を理解することから始める。Fig. 18 の下の図を参照されたい。F-9 断層の破碎帯 (赤く塗色) の左 (西) 側の基盤 (蒲野沢層) 上面は右 (東) 側の泊層のそれより 3.9m 低い。しかし、変位はシャープな断層面で生じているわけではなく、15m ほどの区間で漸移している。漸移的とは言っても少し複雑で、破碎帯の直上では基盤上限と第四系が 1.6m ほど上に凸に撓んでいる。このことから、何らかの原因で西下がりの撓曲が起こり、断層破碎帯に限定された上昇運動が伴われているということである。

この現象をよりマクロに眺めたのが Fig. 18 の上の図である。縦横比が約 5:1 となっている事に注意。中央で高まっている基盤上面がわずかに東に傾いていて、これを直線で近似して断層変位を測る基準線とする。F-9 の西側の基盤上面が東に向かって高くなることを変形によるものとみなせば、F-9 両側の基盤上面食い違いは 5.6m となる。これは食い違いの上限値を与える。これに対して第四系の M1d 層上限の食い違いは約 1m である。したがって、

食い違いは“累積的”である。

以下にもう少し詳細に見る。M_{1a}層は礫層だが、F-9断層を越えて東側の基盤を覆っている（Fig. 18の下図）。Tr-20'2の北140mで行われた東西方向の群列ボーリング2φ80によれば、M_{1a}層は基盤の食い違い境界を越えて東側に50m以上も広がっている（敷地内断層の活動性等の評価に係る追加地質調査報告書、添付資料3、平成26年1月17日）。このことは、M_{1a}層堆積時には東西両側での地表の高低差は無かったことを示唆する。東北電力は、M_{1b}からM_{1d}層の境界を理由を明示せぬまま3度も変えたので、どれが適切かを吟味できない。しかし、Fig. 18のM_{1b}層とM_{1c}の下半部は東側の高まりに向かってアバットして堆積し、しかもその後に西側が撓み下がる変形を受けているので、堆積時に西側が沈降し、その後も沈降したことは明らかである。この間に総変位（上限値5.6m）の主要部分が生じた。M_{1c}層の上限もM_{1d}層の上限も食い違い量は1m程度と変わらないので、M_{1d}層堆積中には食い違いの増加が一時停止し、その後に1mだけ増加した。したがって、食い違いがF-9断層の東西両側の累積な昇降運動によることは明らかである。東北電力は先ず西側に浸食性の“溝状凹地”（チャンネル）在りきで、そこを堆積物が埋積するというだけだと主張するが、それでは上に述べた現象を説明しきれない。

F-9断層破碎帯直上の上に凸の撓みは、「1. “第四系変状”とは何？」の項で説明した機構による。すなわち軟質な破碎物質が上昇したため、上昇の原因が断層粘土の吸水膨潤でも断層面に垂直な圧縮力による絞り出しでも良い。撓曲の西翼の傾斜が東翼より緩やかで長く、非対称な凸になっているのは、西傾斜のF-9断層破碎帯の東縁に小さな逆断層を伴っているからである。

F-9断層に沿う変位量の全体像を見るために、Fig. 13を下に再録した。これを見ながらF-9断層の“第四系変状”の特徴をまとめる。

- ① 北端のTr-4での78~107cm W-up 撓曲主体 → iトレンチでの23~32cm W-upの撓曲 → Tr-17での15cm W-upの逆断層または撓曲と、南に向って約300mの区間で鉛直変位が系統的に減少する。このような変形は、F-3断層のインバージョンと言ってもよい。
- ② 2iトレンチからjトレンチを経て2jトレンチ500m余りの区間は、基盤を直接被覆するのがTo-Rd軽石層より若い地層のためか、F-3に明瞭な“第四系変状”が認められない。
- ⑤ kトレンチから2kトレンチを経て2k'トレンチまでの500mの区間では、基盤を直接覆うのがM₁層であっても明瞭な“第四系変状”が認められない。
- ⑥ Tr-31トレンチとそのすぐ隣のℓ(2)トレンチでも、基盤を直接覆うのがM₁層であっても明瞭な“第四系変状”が認められない。しかし、Tr-31トレンチではF-9断層近傍に30cm W-upの逆断層がある。
- ⑦ Tr-20'2とTr-20'では、破碎帯直上の背斜状撓みと破碎帯東縁のW-upの小逆断層、および5mに達する東側上昇/西側下降の累積的撓曲運動が識別できる。とくに後者はF-9断層の他の観察地点には見られない。

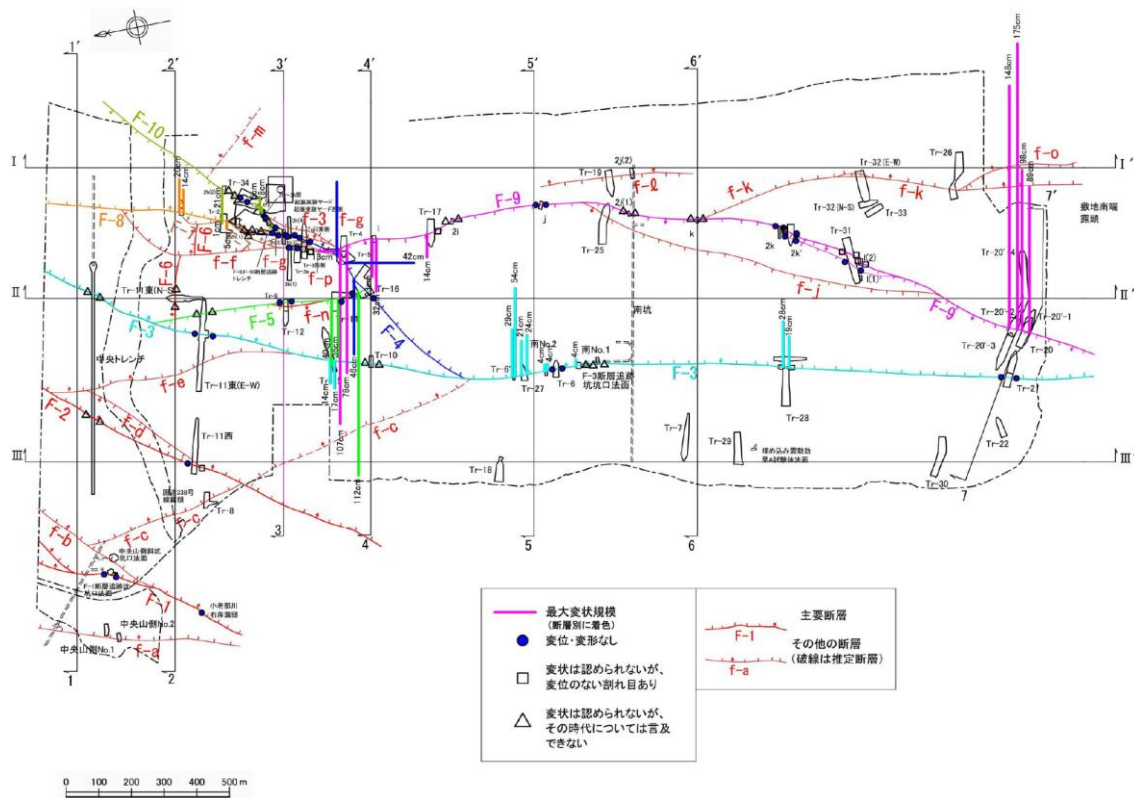


Fig. 13 主要な断層沿いの第四系変状の鉛直変位量.

第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-2, p.28 から転載.

すなわち、F-9 断層の北部 300m 余りの区間での“第四系変状”は明瞭で、鉛直変位が北端部での約 1m から南に向かって減少する W-up の“インバージョン”的な活断層運動である。その南では F-3 断層自体の“第四系変状”は無いか不明瞭である。ただし、Tr-20'-2 トレンチの“第四系変状”は飛びぬけて大きく明瞭であり、次の項でこれを吟味する。

9. F-9 断層の東側の隆起の原因

トレンチ Tr-20'-2 と Tr-20 における F-9 断層付近では、5m に達する西落ち/東上りの撓曲運動が識別されたが、3m ほど高い東側の地形的高まりの西縁もこの F-9 にはほぼ一致している。この地質的・地形的構造がなぜ北方に続かないのか。この実態を理解するのが表題の“隆起の原因”を探る手掛かりとなる。

そこで、ボーリングデータを活用する (下の Fig. 19 の黒丸; ボーリングデータは「敷地内断層の活動性等の評価に係る追加地質調査報告書, 添付資料 3, 平成 26 年 1 月 17 日」を参照)。注目するのは Tr-20'-2 で見られたような西側で厚く、東側で薄い M₁ 層である。

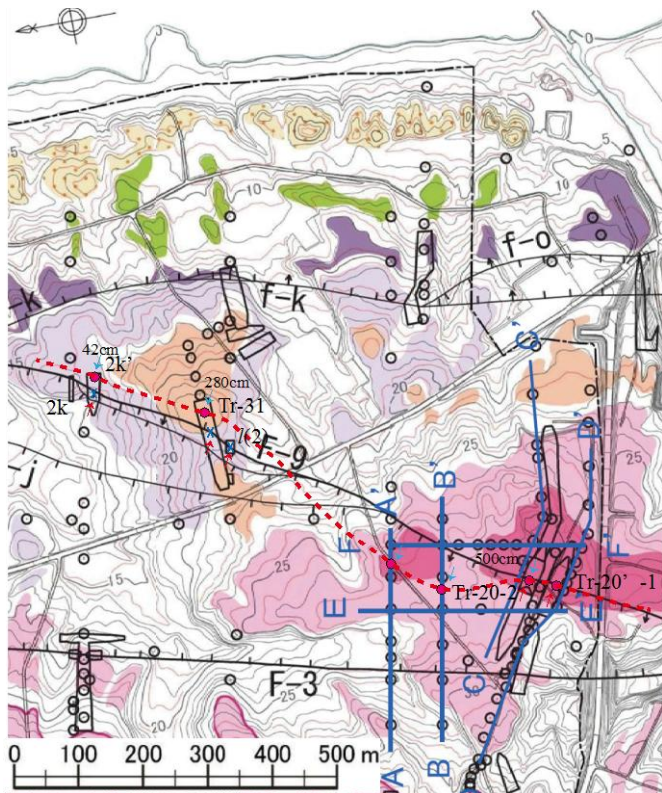


Fig. 19 F-9 断層東側の地形・地質の高まりの西側境界. 赤い破線はトレンチとボーリングデータから推定したもの. 原図は第 9 回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-2, p.13 から.
黒丸はボーリングの位置, 青紫の線は群列ボーリングの並び.

この境界を群列ボーリング B-B'線と A-A'線上で探すと, そのような境界は確かに北に延びていて, それらの位置を赤い○で示してある. このことは大槻からのコメント (その 4) がすでに指摘している. 後になって, 東北電力は同じデータを用いてこれらの位置を“溝状凹地”の東縁とした (第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-1). この境界はさらに北にはどのように延びるのか, 散点的にボーリングはされているようだが, 東北電力もさらに北への延長を描いていない. レーダー探査断面 (第 11 回評価会合配布資料 参考資料 6-1&2) ではよく見えていない.

そこで参考になるのが第 7 回評価会合に熊木委員が提出した資料である. 彼の指摘する地形的リニアメントは, 上述の群列ボーリング B-B'線と A-A'線上の 2 点を通り, さらに北方の Tr-31 と 2k' トレンチを通過して北に延びている. そこで, この 2 つのトレンチを見る.

Tr-31 の東半分を Fig. 20 に示す. F-9 断層とされているものが動いている様子はない. その付近は最も下降していて, 向斜状撓曲の底の部分である. 背斜状撓曲はその 40m 東にあって, 南北から北東方向の共役小逆断層が多数ある (記載されているものだけで 6 本). トレンチ北面には背斜状撓曲の頂部に 40cm E-up の逆断層がある. 向斜状撓曲の底から 40m 西にも背斜状撓曲がある (Fig. 20 の範囲の外). これら東西の両背斜頂部を結んだ線

を変位基準とすれば(この勾配は水平線と *foreset bedding* の層理面の傾斜とのほぼ中間), 基盤上面の両振幅は 2.3m である. この長波長 (約 40m) の褶曲にはローム層まで参加して、同様の変位基準を採用すれば, ローム層の下限の両振幅は 1.3m となる. したがって, 褶曲運動は累積的で, ローム層堆積以降も続いている. 東側の背斜に多くの逆断層が伴われていることをも考慮すると, Tr-20'-2 での F-9 の東側の隆起域は, Tr-31 の東の背斜に続く可能性がある.

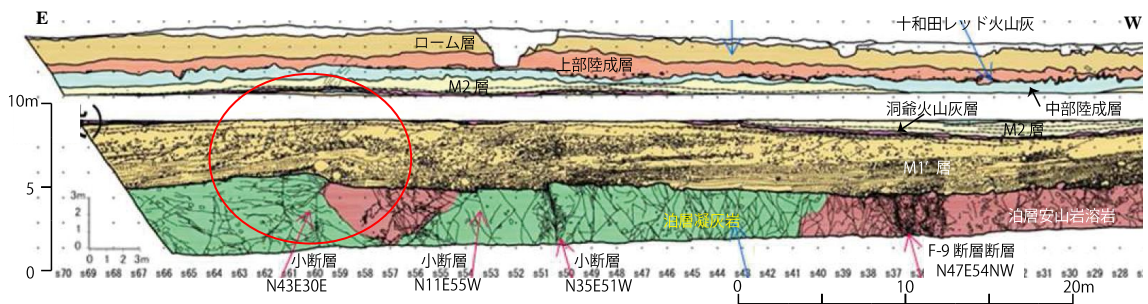


Fig. 20 Tr-31 トレンチ東半分の南面スケッチ. 第 7 回評価会合配布資料 東通・現調 8-1 から転載.

トレンチ 2k' の南壁のスケッチを Fig. 21 に示す. トレンチの東端には鉛直変位 31cm E-up の小逆断層 (N8°W48°E) があり, 第四系は撓曲となっている. M₁'層上限で測った撓曲による鉛直変位は 50~60cm である. 地形高度も撓曲構造と調和的で, 東側が高い. この撓曲は Tr-31 トレンチ東端の背斜に連続する可能性が高い.

活断層であることを嫌う東北電力は, F-9 断層の西側を溝状凹地 (チャンネル) にしようとし, 有識者の一部は F-9 断層とその東側の地形・地質の高まりとの関係の理解に手間取った. しかし, 上の検討を通じて, F-9 断層ではなく, Tr-20'-2 (鉛直変位 5m) → Fig. 19 の群列ボーリン上の 2 つの赤○ → Tr-31 東端の背斜 (鉛直変位 2.3m) → トレンチ 2k' 東端の撓曲 (0.5~0.6m) と系統的に変化する長さ 800m を越える活構造境界が新たに見えてきた. この境界は有識者会合の熊木委員が指摘した地形的リニアメントにも一致する. ただし, この境界は地表では顕著な断層ではなく, 撓曲を主体とするものである.

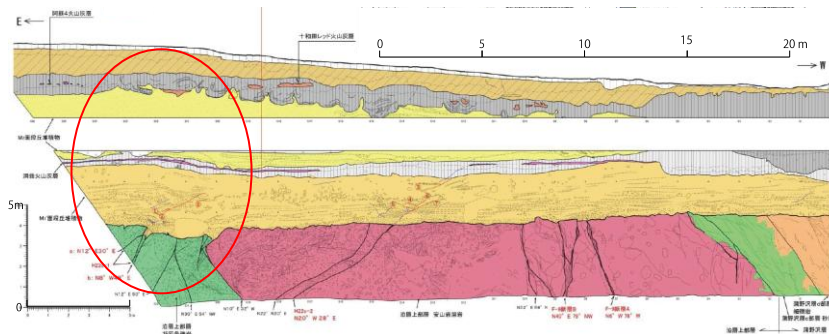


Fig. 21 トレンチ 2k' の南壁のスケッチ (第 7 回評価会合配布資料 パネル 3 から転載)

では、撓曲の本体は何であろうか。まず、いずれのトレンチにおいても“撓曲”や“背斜”付近に多少なりとも小逆断層が伴われていて、その多くは南北～北東方向であることが特徴的である。このことは、地下に北北東方向の長さ 800m 以上の逆断層が伏在することを示唆する。Fig. 18 の上の地形・地質断面図は、そのように考えに矛盾しない。伏在断層の上盤側にはより小規模な逆断層があって、構造を修飾している。小断層 s-19 もその中に過ぎない。F-9断層と F-9断層の東側の高まりを作った伏在断層は別物なのだから、高まりを作るために F-9 の正断層運動を無理に考える必要もない。同様に、F-9断層の北部が西上がりであるのに対し、南の Tr-20'-2 では東上がりあることも、何ら問題ではなくなる（東北電力はこのことも F-9 がテクtonic な断層でないと主張する根拠の一つにしていた（第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-1,p.14)）。

では、ボーリングでこの伏在断層は捉えられていないのか。それは、Tr-20-1 トレンチ脇のボーリング BQ-1（「東北電力株式会社 東通原子力発電所敷地内断層の活動性等に係る評価結果、平成 24 年 5 月 14 日、東北電力株式会社、地震・津波 16-6」の p.16）で捉えられているのかもしれない。深度 12.19m~12.36m に“砂状破碎部、12.23m に厚さ 0.7cm の灰白色粘土、傾斜 30°” および“13.06m~13.12m に岩片状破碎部”という記載がある。大槻からのコメント（その 4）や第 12 回評価会合での佐藤委員からの配布資料で指摘されているが、東電からの回答が無い。是非とも吟味すべきである。

10. 原子炉建屋付近の断層について

東北電力が f-1 断層を活断層でないとした根拠は、以下の 2 点である。

- ①基盤上面が変位していず、被覆 M₁ 面段丘堆積物も変形していない。
- ②f-1 断層を延長した上盤側寄りには高角の小さな正断層が発達し、変位のセンスが f-1 とは逆であり、その上、正断層の変位量は下方に向って減少し、消滅する。

まず、下の Fig. 22 で実態を確認する。

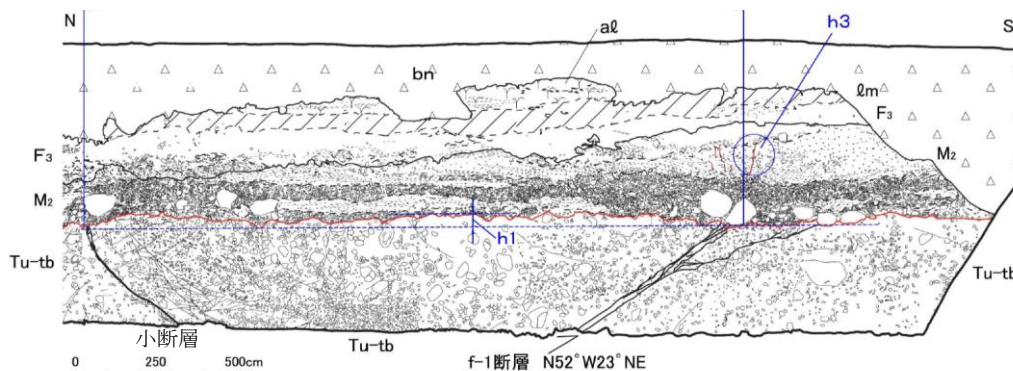


Fig. 22 トレンチ Tr-34 東面の f-1 断層とその北の小断層付近の変形。第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-5, p28 から転載

f-1 断層とその 14.5m 北の“小断層”とに挟まれた区間の基盤上面（図の赤線）は、東北電力も述べていることだが、20~30cm ほど高くなっている。このことはこれらの断層が逆断層の変位を有していることを示唆する。Fig. 22 を横に押し潰したのが Fig. 23 で、確かに 2 つの断層に挟まれた区間は高くなっている。しかも、基盤上面が“ふたこぶラクダ”になっていて、凹部が北（左）寄りである。この形状は、f-1 断層も北側の“小断層”も逆断層で、両者に挟まれた区間がポップアップされていることを示唆する。凹部が北寄りなのは、f-1 断層の深さ方向の先端が“小断層”のそれより深いためと考えればよい。

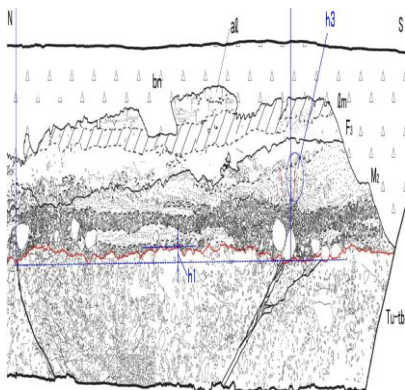


Fig. 23 基盤上面の凹凸を強調するため、Fig. 22 を横方向に圧縮した図。

断層変位が基盤上面の急激な段差として現れないのは、劣化岩盤が延性的で、撓曲になり易いからである。このことは、すでに「3. 延びずにすぐ消えてしまう断層」の項で詳しく述べた。また、このような事例は第 9 回評価会議配布資料の参考資料 2-1 から 2-6 に掲載されている“第四系変状”に普通に見出すことができる。断層の延長部が第四系の中に現れないのは、M₂ 層の下半部が粗粒砂～細礫から成るためであろう。

逆断層の第四系への延長部の上盤寄りにできる正断層や裂罅の成因に関しては、5. 「第四系中の断層や裂罅の下方延長部の基盤岩に断層本体見えないことがある」において詳しく述べた。②に述べられている“正断層”は、まさにこの正断層のことである。したがって、②の現象は、むしろ f-1 断層が M₂ 層堆積後に逆断層として活動したことを示唆する証拠なのである。

東北電力は、さらに「f-1 断層上方の小さな正断層が岩盤の劣化膨張で形成された」と誤りを重ねる。“劣化膨張説”は「第一部 全くデタラメな岩盤の“劣化膨張説”」ですでに完全に否定されたので、今さら言及するまでもないが、東北電力の言い分を聞いてみよう。彼らの根拠は以下の 3 点である。

- (a) 基盤岩の高劣化部に対応して、基盤上面と M₂ 層が周囲より 20~30cm 高くなっている。
- (b) f-1 断層上方の小さな正断層には開口しているものがあり、上方ほど変位量大きい。
- (c) FEM による体積膨張シミュレーションにより、f-1 断層とその北側の小断層に挟まれた

区間の緩やかな上昇、および第四系に発生する引張応力を再現した。
すでに述べたように、(a)は向い合う f-1 断層と“小断層”との間のポップアップで説明できるので、“劣化膨張”の証拠とはならない。(b)も活断層ではない証拠として東北電力が挙げた証拠の②に対する反論として既に詳しく述べたので、繰り返さない。

(c)に関しては第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1 と第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-1 にまとまった解析結果が掲載されている。そこで“膨張解析”と称されている Fig. 24 の(A)は、弾性体を仮定し、計算領域の底と左右の境界条件として、境界に直交する方向の変位を固定、平行な方向の変位は拘束無しとする。基盤岩の要素にだけ劣化度に対応した体積歪（不動元素 (Ti) 法を機械的に適用して求めた体積歪で、劣化度 A と B は 0, C は 0.07, D は 0.22, E は 0.33) を与え、応力や歪を出力するというわけである。この数値シミュレーションの限界は「15. 有限要素法による“膨張”による“第四紀変状”の再現実験」で述べた。不動元素法の不具合は「第一部の 7. 不動元素 (チタン) 法で体積歪は計れない」で詳述した。劣化岩盤は延性的成分が大きいことに関しては「3. 延びずにはすぐ消えてしまう断層」の項で詳しく述べた。ここではそれらのことは脇に置き、その他の問題点を吟味する。

左右の境界で水平方向の変位を拘束した状態で基盤の各要素を膨張させるので、当然基盤岩全体が水平圧縮応力状態になる。問題の f-1 断層と“小断層”は前もってセットされていて、変形し易い物性が与えられている。計算領域の下底で垂直方向の変位が拘束されているので、これらの断層の下盤に当たる左右の領域は断層に沿って **thrust-down** しにくく、楔のように働いてそれらの上に乗った逆三角形の領域を押し上げる。この逆三角形の領域自身も膨張しつつ断層に沿ってすべり上がりながら膨らむ。その結果、隆起域は台形になってしまい、Fig. 23 の“ふたこぶラクダ”が再現されない。被覆第四系は受動的に変形するが、膨張する逆三角形（それでも圧縮応力状態）の上の第四系は水平に引き伸ばされ、**全体が引張応力状態になる**。実際の正断層と裂罅は f-1 断層の延長部の上盤寄りにしか発達していないので、“膨張解析”ではこれも再現出来ていない。

東北電力は側方から水平に圧縮した“圧縮解析”も行っている (Fig. 24 の(B))。この場合には、当然ながら基盤岩の領域も被覆第四系も全体的に圧縮応力状態になる。逆断層の **dislocation model** と同様、f-1 と“小断層”の上盤側に沈降域が伴われる。これは Fig. 23 の“ふたこぶラクダ”を再現している。計算では、基盤表層部と第四系付近に変形が過度に集中しているが、f-1 断層のモデル化が不適切だからである。すなわち、f-1 断層を直線的なものにし、計算領域の底にまで達するようセットしたことである。そのためこの断層はとてすべりやすくなり、f-1 断層の上方先端部を覆う第四系に変形が過度に集中してしまうことになった。**f-1 断層を曲げるとか途中で止めるというような修正を施せば、より現実になるだろう**。被覆第四系は全体が圧縮応力状態になり、2つの逆断層の上端を覆う部分のみに曲げ変形による弱い引張応力場が発生している。これは、正断層や裂罅が特定の領域のみに発生している事実と調和的である。

上に吟味したように、注意深く吟味すれば、数値実験結果も“体積膨張”の必要性を示しているわけではなく、むしろテクトニック起源を想定した“圧縮解析”の方が実際に近いのである。

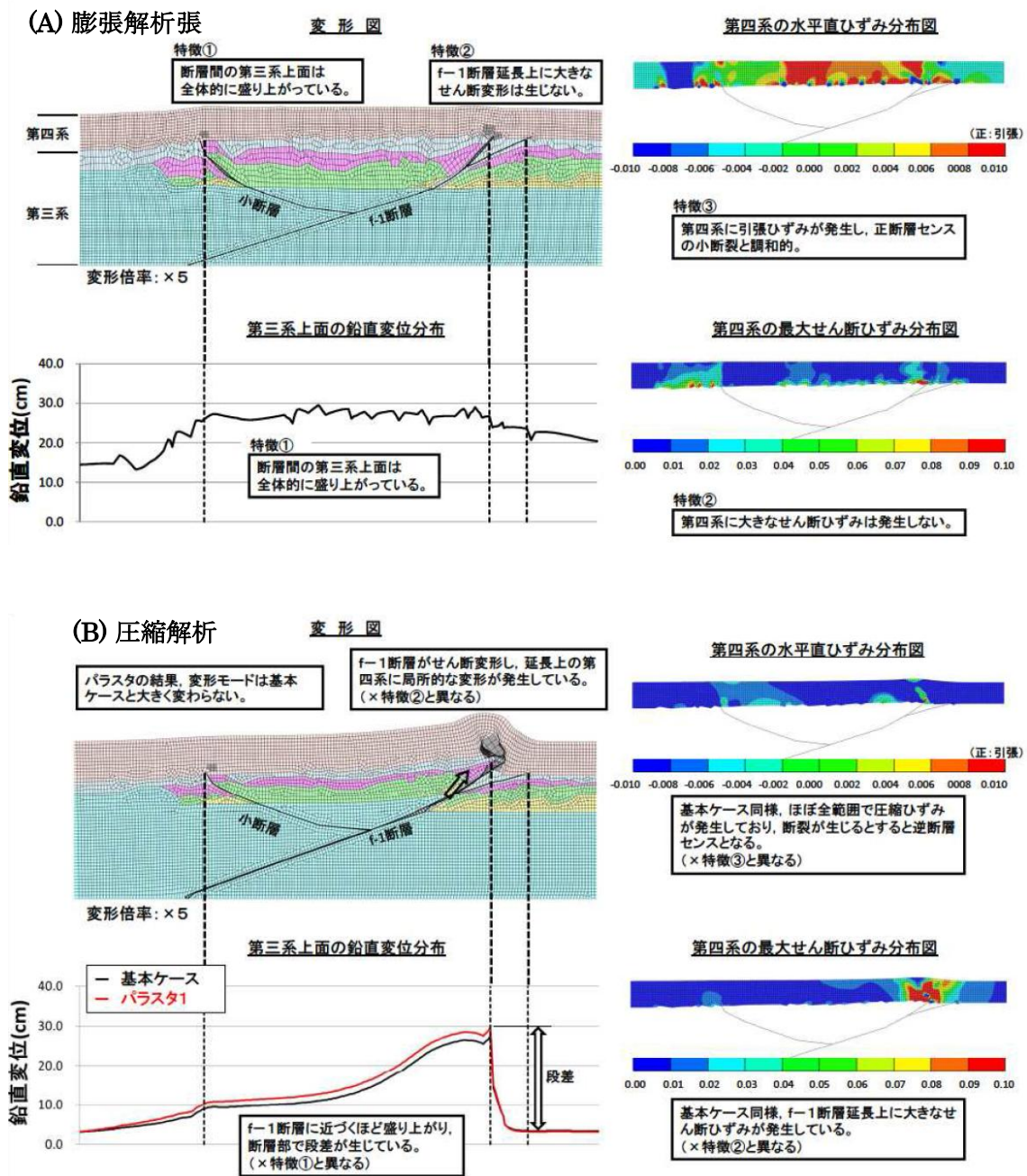


Fig. 24 FEMによるTr-34で観察されるf-1断層付近の変形解析。(A)は要素に体積膨張を与えた場合。(B)は横方から圧縮した場合。第11回評議会合配布資料 東通・現調 12-2-1 から転載。