

2015年6月22日

東通原発敷地内活断層評価有識者会合殿

コメント（その10）

東北大学名誉教授 大槻憲四郎

*** 連番を維持するため、大槻からのこのコメントをコメント（その10）とし、ひとつ前の2015年1月14日付けのコメント（番外）をコメント（その9）とすることにする ***

このコメント（その10）では、以下の2点に関してコメントする。

- ① 「下方に延びない第四系中の裂罅・正断層」の成因
- ② 原子炉建屋付近の断層の吟味—とくにFEMによる解析について

①に関しては、何回目かの評価会合における有識者からの適切なコメントによって解決したと思っていたが、評価報告書に書かれた内容やそれを平成27年3月25日開催の原子力規制委員会に報告した際の説明から、それがまだよく理解されていないと推察されたので、ここに改めて解説しておく。これは②の現象を正しく理解する際にも役立つ。

②に関しては東北電力が有限要素法を用いた解析を行っていて、その結果が“岩盤の劣化膨張説”を支持すると主張している。しかし、評価会合はこの有限要素法解析結果をほとんど吟味していなかったのに加え、東北電力の主張が誤っているので、これも吟味した。

1. 「下方に延びない第四系中の裂罅・正断層」の成因

東北電力は、「第四系中に発達する裂罅や正断層の下方延長の基盤岩に断層の本体が見当たらない」ことが不思議だとして、“第四系変状”がテクトニックではなく岩盤の劣化膨張を示唆する現象だと考えた。これに対し、何回目かの評価会合においてある評価委員が適切なコメントを述べた。それは、そのような裂罅・正断層は、板曲げに伴って発生する中立面の外側領域での引張応力によるとの主旨であった。ところが、これが未だよく理解されていなかったようである。

まず、「第四系中に発達する裂罅や正断層の下方延長部の基盤岩中に断層の本体が見当たらない」典型的事例を Fig.1 に示す。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いる。この撓み下がりをも埋め合わせているのが主に F₂ 扇状地堆積物であり、その下位の M₁ 段丘面堆積物と上位の F₃ 扇状地堆積物の層厚はほとんど変化していない。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ことになる。

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裂罅・小正断層が出現し始め、傾斜が増加し続け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。これらの裂罅・正断層は 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。

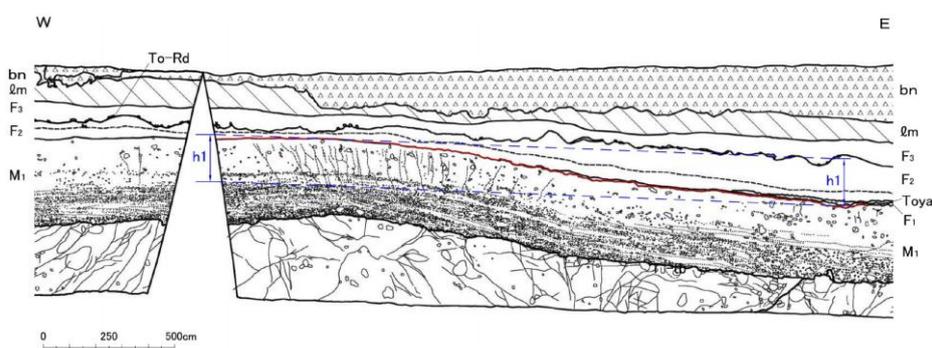


Fig.1 Tr-20'4 トレンチ南面・T-8 (東西反転) のスケッチ (第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-5) .

裂罅 (開口性割れ目) や小正断層は M₁ 段丘面堆積層の上半部で、かつ層理面の傾斜が増加し続ける領域に限って発達していることに注意。

このような現象は何も不思議なことではなく、板の撓みに伴うものである。これは力学の基本問題のひとつで、詳細は例えば Turcotte, D. L. and Schubert, G., 1982, *Geodynamics : Application of Continuum Physics to Geological Problems* を参照されたい。ここでは、その中から必要な部分のみを引用する。

モーメント M によって厚さ h の板が撓むと、中立面 (neutral surface) の上下に板と平行な圧縮 (短縮) と引張 (伸び) の法線応力 σ_{xx} (法線歪 ϵ_{xx}) が発生する (Fig.2) . dw/dx は撓みにともなう y 方向の変位 w の変化である。

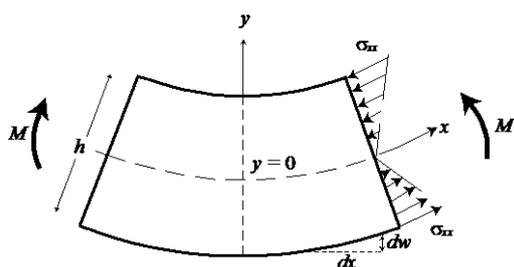


Fig.2 モーメント M を作用させたときに厚さ h の板の内部に発生する応力と中立面、および y 方向の変位 w の変化 dw/dx .

釣合の方程式は以下のように書ける。

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} y dy . \quad (1)$$

板が弾性体であれば、 $\sigma_{xx} = (E/(1-\nu^2))\epsilon_{xx}$ の関係があり、無限小歪の仮定が成り立つ範囲なら、幾何学的関係から $\epsilon_{xx} = -y(d^2w/dx^2)$ が成り立つので、

$$\sigma_{xx} = -\frac{E}{1-\nu^2} \cdot y \frac{d^2w}{dx^2} \quad (2)$$

である。ただし、 E はヤング率、 ν はポアソン比。

式(2)の意味するところは、Fig.1 の場合のように右に向うにつれて地層が撓み下がる（すなわち $d^2w/dx^2 < 0$ ）場合は、 $y > 0$ で引張応力が発生し、それは上方ほど大きくなるということである。Fig.1 の場合、右側に向うにつれて地層の傾斜が増加し続ける区間の M_1 層上半分のみ裂罅・小正断層が発達しているの、まさに理論通りなのである。なお、Fig.2 に示されているように、中立面の内側には圧縮応力が発生するが、一般に圧縮強度は引張強度よりずっと大きいので、正断層に比べて逆断層は発生し難い。

$d^2w/dx^2 = 0$ の点を inflection point と呼ぶが、左右の inflection point を挟んだ上に（下に）凸の部分では、板の上半部（下半部）に引張応力とそれによる裂罅・小正断層が発生するというわけである。そのようなことに留意して全ての「第四系変状」を網羅した第 9 回評価会合配布資料の参考資料 2-1～2-6 を参照すれば、裂罅・小正断層が良く発達するのは、 M_1 段丘面堆積物の上半部の砂層部であり、かつ左右の inflection point を挟んだ上に凸の部分であることが分かる。理論的には、左右の inflection point を挟んだ下に凸の部分では M_1 層下半部にも裂罅・小正断層の発達が期待されるが、それは極めて稀である。その理由は、 M_1 層下半部が裂罅・断層の発達し難い礫層や粗粒砂層で占められていることが多いためであると思われる。

上記の板の撓みと裂罅・小正断層の発達に関する理論を Fig.3 に示す事例に応用してみる。

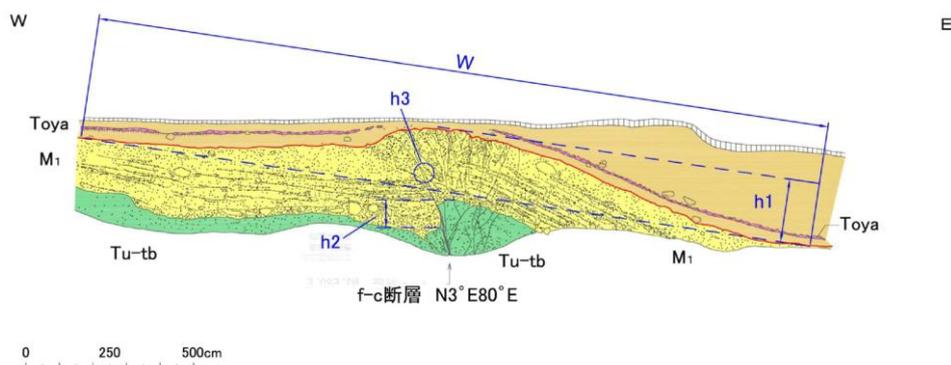


Fig.3 国道 338 号沿いの露頭南面 f-c 断層のスケッチ（東西反転）

（第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-3）。

これは、逆断層を伴う非対称の背斜である。基盤岩中の逆断層は M_1 段丘面堆積層の上限

付近まで延びている。この小逆断層の上盤側には $d^2w/dx^2 < 0$ の領域があって、裂罅・小正断層はこの領域内でかつ M₁ 層上半部によく発達していることが分かるであろう。

以上のように、「第四系中に発達する裂罅や正断層の下方延長の基盤岩に断層の本体が見当たらない」ことは、板（主に M₁ 層）の撓みの力学で無理なく説明できるのである。

2. 原子炉建屋付近の断層の吟味—とくに FEM による解析について

表題の件に関しては、トレンチ Tr-34 東壁面で観察される f-1 断層とその 15m 北にある“小断層”に関わる“第四系変状”が主要な評価対象になっているので、ここでもそれらに焦点を絞って検討する。

下の Fig.4a にあるように、f-1 断層と“小断層”は、共に NW 方向で、共役の小逆断層のように見えるが、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（図の赤線）が変位していず、被覆 M₂ 面段丘堆積物も変形していない。ただし、f-1 断層と“小断層”とに挟まれた 15m ほどの区間の基盤上面は 20~30cm ほど高くなっている。
- ② f-1 断層を右上方に延長した上盤側寄りには高角の小さな正断層が発達し（図の青○付近）、変位のセンスが f-1 断層とは逆であり、その上、正断層の変位量は下方に向かって減少し、消滅する。

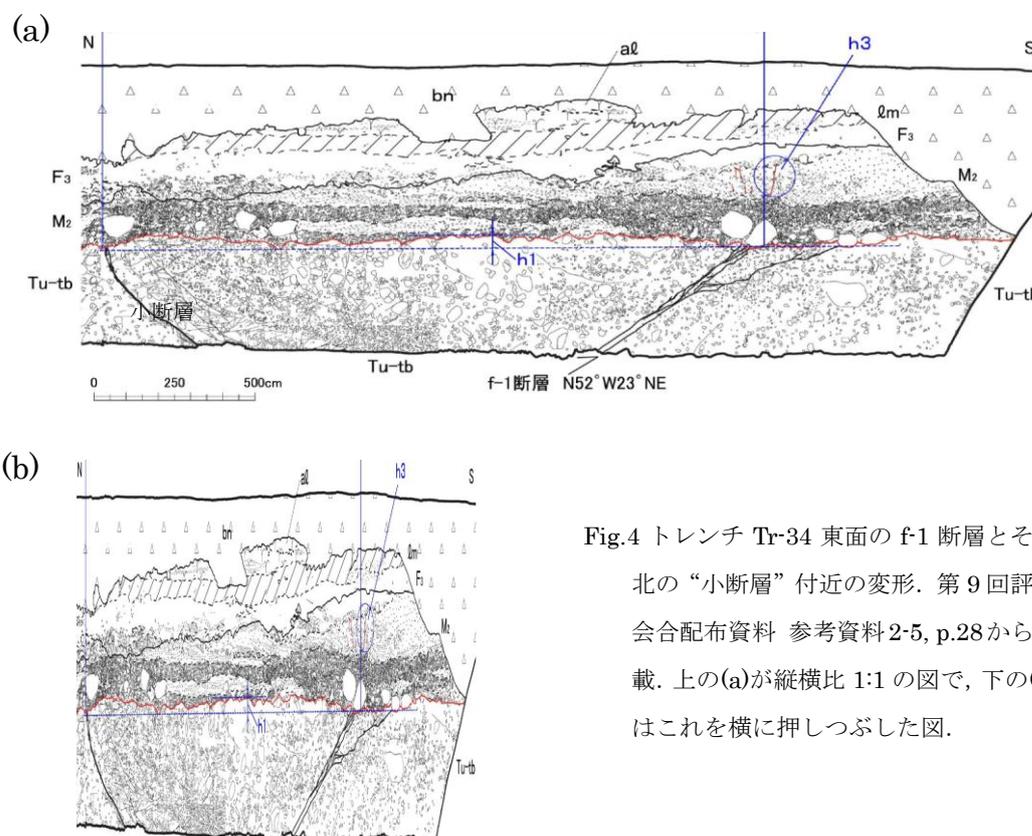


Fig.4 トレンチ Tr-34 東面の f-1 断層とその北の“小断層”付近の変形。第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-5, p.28 から転載。上の(a)が縦横比 1:1 の図で、下の(b)はこれを横に押しつぶした図。

上の①の記述では、「基盤上面も M₂ 面段丘堆積物も変形していない」と言いながら、他方では「f-1 断層と“小断層”とに挟まれた区間の基盤上面が 20~30cm ほど高くなっている」というような矛盾した記述になっている。この事実認識をはっきりさせるため、Fig.4a の図を横に押し潰して縦横比を誇張したのが Fig.4b の図である。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、基盤上面の高まりは“ふたこぶ”になっていて、“こぶ”の間の凹部が北（左）寄りである。これが事実である。この形状は、f-1 断層も北側の“小断層”も小さな逆断層で、凹部が北に偏っているのは、“小断層”の深さ方向の先端が f-1 断層のそれより浅いことを示唆する。

2 つの小逆断層とも断層面を挟んで変位がなだらかに移り変わっていて、これが事実である。このような現象は、劣化岩盤が延性的であるため、撓曲になり易いことによる。東通原発敷地内の小断層が延性的であることは大槻からのコメント(その 7)の 1 と 2、(その 8)の 5、および(番外またはその 9)の II の 2 で詳しく指摘している。さらに、これらと似た事例は、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。

②で述べられていることは、まさに 1 の「下方に延びない第四系中の裂罅・正断層」の成因の項で述べた板の撓みの力学の事例そのものである。すなわち、Fig.4b に示されているように、f-1 断層の上盤側基盤上面はなだらかに上に凸に撓んでいるので、f-1 断層の上方延長部の上盤側の M₂ 層には引張応力が発生したと期待されるが、実際にそこには小正断層が発達しているのである。この現象は、f-1 断層が M₂ 段丘面堆積層の堆積中か堆積後に活動した逆断層性の活断層であることの確かな証拠である。

東北電力は、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できたと主張し、“岩盤劣化膨張説”の正しさの一つの根拠としている。この FEM 解析に関しては、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 にまとめた解析結果が掲載されているので、以下にこれらを吟味する。

FEM モデルはバイリニア弾性体を仮定していて、ある歪量を越えるとヤング率を切り換える。実際には切り換わった後のヤング率はゼロにしているようなので、完全弾塑性体あるいは St. Venant 物体近似に近いのかもしれない。基盤岩中には予め断層をセットし、弱い物性を与えている。大槻からのコメント(その 7)の 1 と 2、同(番外または 9)の II の 2 など指摘しているように、東通原発敷地内の劣化岩盤は延性的である。そのため、長時間の間に応力は緩和してしまうので、粘弾性体近似が望ましい。しかし、これらの物性の妥当性吟味に関してはほとんど報告されていないので、深入り出来ない。

東北電力はバイリニア弾性体平面歪近似の下で“膨張解析”と“圧縮解析”と称する 2 種類のモデル計算を行っている (Fig.5 の A と B)。“膨張解析”では、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を与えている。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の平均値で、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。不動元素法の不具合は、大槻からのコメント（その 5）で詳しく指摘したので、ここでは述べない。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。

左右と底の境界で境界に直交する変位を拘束した状態で、基盤の各要素を劣化度に応じて膨張させるので、当然基盤岩全体が水平圧縮応力状態になり、自由表面の地表面は隆起する。岩盤劣化は f-1 断層と“小断層”で囲まれた“逆三角形領域”で最も著しいので、この領域では水平方向の伸びも隆起も最も顕著になる。他方、劣化度が小さい 2 つの断層の下盤側領域はあまり膨張させないので隆起量も少なく、膨張の著しい“逆三角形領域”から押されるので、水平に短縮する。体積歪ゼロを与えられている第四系は基盤岩の変形に受動的に応答する。“逆三角形領域”の膨張に対応して鏡餅の表面ように隆起するとともに、水平方向に延びる。水平引張応力は当然“逆三角形領域”の頂点の真上付近で最大になる。2 つの断層の両側の第四系の隆起は軽微で、基盤の水平短縮に受動的に応答して縮み、水平圧縮応力となる。

上の全体的な変形の特徴は、f-1 断層と“小断層”の効果によって修飾される。これらの断層には変形し易い物性が与えられているので、上の“逆三角形領域”が膨張・隆起するときには、これらの断層に沿ってすべり上がる。その結果、隆起域は“鏡餅”から台形に近づくが、Fig.4 の“ふたこぶ”状隆起は再現されない。“逆三角形領域”の膨張に伴う断層すべりが断層の上方先端部に集中し、その直上の第四系内の圧縮応力を増加させる。したがって、f-1 断層上方延長部の上盤側も圧縮応力場になってしまい、期待された裂罅・小断層は発生しない。水平引張応力場のままなのはさらにその内側である。第四系中で水平引張応力が最大になるのは“逆三角形領域”の頂点の真上だが、そこには裂罅・小断層は発達していない。

このように、FEM による“膨張解析”では“ふたこぶ”状隆起も f-1 断層上方延長部の上盤側に認められる裂罅・小断層も再現できないのが実態なのである。

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.5 の(B)）。f-1 断層と“小断層”は予めセットされていて、変形し易い物性が与えられている。底の境界条件は、境界に平行な変位は自由で、垂直な変位は固定である。左右の境界に平行な変位は自由で、水平方向に一樣な強制変位を与えている。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。側方からの短縮とともに f-1 断層と“小断層”は逆断層として活動し、dislocation model と同様、2 つの断層の上盤側に沈降域が伴われる。これは Fig.4 の“ふたこぶ”の隆起を再現しているが、実際よりかなり非対称である。これは f-1 断層を直線的で計算領域の底にまで達するようにモデル化したため、過剰にすべり易

なくなったためである。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、より現実に近くなるだろう。f-1断層を境に基盤上面に断層変位にともなう不連続的な段差が生じたのは、弾性体モデルだからで、粘弾性体的なモデルならなだらかに変わるだろう。

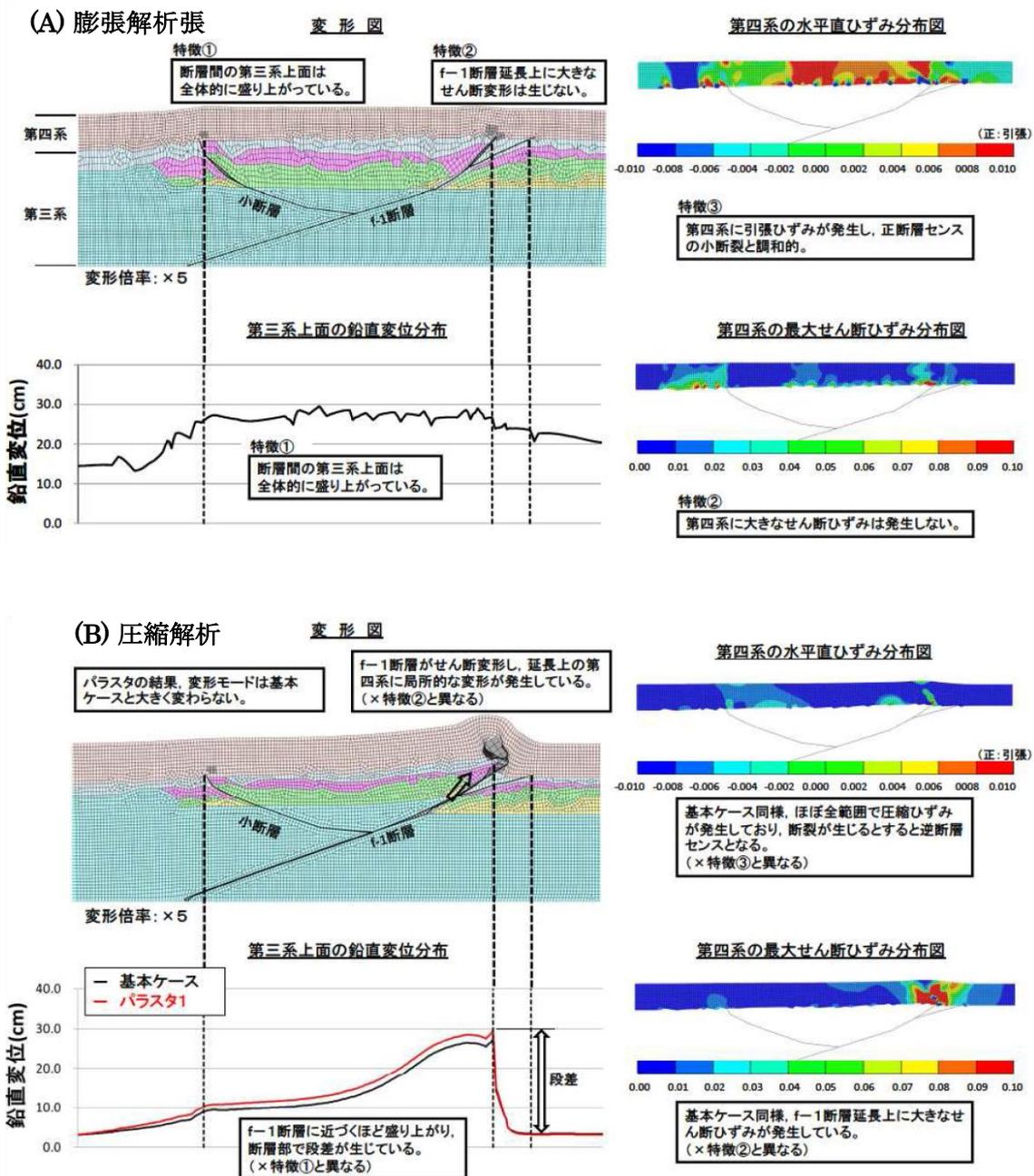


Fig.5 FEMによるTr-34で観察されるf-1断層付近の変形解析。(A)は要素に体積膨張を与えた場合。(B)は横方から圧縮した場合。第11回評議会合配布資料 東通・現調 12-2-1 から転載。

f-1 断層を過度にすべり易くモデル化した効果と弾性体近似の効果は、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も波及している。側方境界を水平方向に強制変位させるので、被覆第四系中の応力場も基本的には水平圧縮になるが、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加わる。その結果、“小断層”の直上の第四系中では圧縮応力が低下しているし、f-1 断層直上付近の第四系中では弱い水平引張になっている。後者の局所引張応力場の発生は、f-1 断層の上方延長部の上盤側に発生している裂罅・小正断層の成因を説明する。

上述したように、“圧縮解析”は“ぶたこぶ”の隆起と f-1 断層上方延長部の上盤側に認められる裂罅・小正断層の両方を再現でき、f-1 断層をより適切にモデル化すれば、再現性はさらに改善されるだろう。以上の吟味は、FEM による数値実験結果も“体積膨張”を必要としていず、東北電力の主張は誤りであることを示している。