

2015年1月14日

東通原発敷地内活断層評価有識者会合殿

## 問題点を正しく理解するための要点

### コメント（番外）

東北大学名誉教授 大槻憲四郎

## I 岩盤劣化，風化，粘土鉱物，膨張・・・にまつわること

### 1. 事実は“膨張”が無かったと語っている

当初東北電力は、岩盤劣化度とともに減少する岩石密度を全て膨張によるとしていた。これは化学風化で元素が溶解・移動することによる多孔質化・低密度化を無視するもので、基礎知識を欠いた愚論であった。2014年3月31日第8回評価会合での議事録には、

「○電力中央研究所（中田）・・・補足させていただきたいんですけど、今まで分析して、東北電力さんがされていたのは、主にガウジ、周りの要はマトリックスのほうですね。岩盤のほう、劣化したところのほうは、あまり重点的には分析はされていなかった。」

「○株式会社ダイヤコンサルタント（高野） システマティックには、していない。」

「○電力中央研究所（中田）そこを私のほうが、去年の後半からですか、劣化部のほうを、褐色化したところをサンプリングさせていただいて分析したら、ハロイサイトが出てきているというのが今の状況です。」

とあり、システマティック分析が始まったのは何と2013年の後半からであって、“体積膨張”説はさしたる根拠もなくそれ以前から提唱され、それを関係者達は放置してきたわけである。

私は“体積膨張”説の非科学性を指摘し続けてきたが、第9回評価会合で初めてまとまった理化学分析データが提出された。これを解析した結果、モンモリロナイト含有率が岩盤劣化度とともに増加するという傾向は全く無く、劣化度CからEに向ってはむしろわずかに減少するか、消滅さえしてしまい、これに代わってハロイサイトが激増することが明らかになった。このことによって「岩盤劣化とともにスメクタイトが増加し、その吸水に伴う膨張圧によって“変状”が形成された」という東北電力の仮説が完全に棄却されてしまったのである。

第7回と第8回評価会合で事業者はTi法を紹介し、それによる体積歪の計算結果を提出した。大槻は事業者が紹介した20編ほどの論文を分析し、①Ti法の精度は一重にTiの不

動性如何にかかっているが、Ti が不動であることを実証している論文は皆無であること（そもそも実証しようとしていない）、②大槻が紹介した Pe-Piper et al. (2011)は、初期続成環境にあった堆積岩中に自生のチタン鉱物を発見し、Ti が不動であるという仮定は成り立たないと結論している等のことを紹介した。このことによって、**Ti 法による体積歪も信頼に足りないものであることが明確になった。**

風化帯の溶脱帯では、とくにアルカリ金属とアルカリ土類金属が溶解して下方に移動し、残存したAlとSiから弱酸性天水の環境下でハロイサイトやカオリナイトが出来るということは、すでによく知られたことである。東通の岩盤劣化もその1例に過ぎないのであって、化学風化に関する基礎知識があれば、このように盲目的に右往左往するのは回避できたのである。

これまで深く議論されたことはなかったが、体積膨張していないことを端的に示す事実がある。下の図1は Komine and Ogata (2004) によるベントナイトの吸水膨潤実験での組織の変化を示す電子顕微鏡画像である。**吸水膨張するモンモリロナイトが次第に孔隙を充たしていく**様子が明らかである。

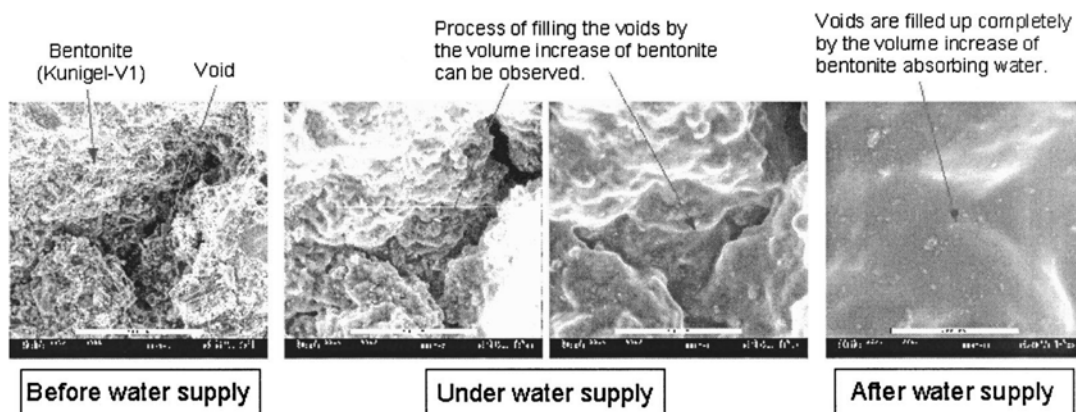


図1 ベントナイトの吸水膨潤の進行に伴う微細組織の変化 (Komine and Ogata, 2004) .

東北電力は第8回評価会合で断層破砕帯からの粘土の電子顕微鏡画像を示したが、それは図1の右端に似ていた。従って、上の文脈からは膨張が期待されるし、確かに破砕帯を覆う第四系が上に凸に撓んでいる。ところが、東北電力は“体積膨張”が破砕帯以外の岩盤劣化部でも起こっていると主張するのだが、示された画像のいずれも孔隙質のスカスカの状態を示していて、図1の左端の画像に対応する。当然ながら、平均密度が  $2.59 \text{ g/m}^3$  であった劣化度Aの岩盤は、劣化の進行とともに低密度化し、劣化度E岩盤では平均  $2.09 \text{ g/m}^3$  になってしまっている。これらの観察事実は、専門的な知識が無くても理解できることであり、**断層破砕帯以外の岩盤は膨張していないことを単純明快に示している**のである。

なお、次の項で述べるが、Komine and Ogata (2004)は上載荷重と膨張歪との関係に関する

るモデルを定式化しているが、そこでは当然ながらまず孔隙を充たしてから膨張が始まるように設定されている。

## 2. モンモリロナイトの膨張のメカニズム

膨張の事実は無いことはもはや明らかだが，“吸水膨潤”説の成否を判断するには、このメカニズムに関する知識が欠かせない。大槻からのコメント（その8）の[参考]に紹介したように、モンモリロナイト結晶中の向かい合う四面体層の間には拡散2重層が形成される。これに伴って形成される電場の重なりが斥力を産む。他方、向かい合う四面体層表面にはファンデルワールス引力が作用する。このようなモンモリロナイト結晶がある相対湿度の大気中あるいは水中に置かれ、結晶底面には法線応力（マクロには上載荷重と呼ばれる量）が働いているとする。引力も斥力もいわば非線形のバネで、斥力の方が大きいので、他の条件を一定にして上載荷重を減じれば（除荷）モンモリロナイト底面層間に水分子が入り込んで膨張するが、層間の結合力は層間距離とともに急激に減少するので、水中のモンモリロナイトの場合にはついには分散状態になる。逆に上載荷重を増せば、層間の水分子は追い出されて収縮する。大気中に置かれた場合、相対湿度の増減とともに層間の水分子も増減するので、マクロには膨張・収縮が起きる。水分子はイオンの周りに水和殻を作って自由エネルギーを減少させているので、海水のような水中に浸されたモンモリロナイトの層間には、淡水の場合に比べて水分子が入りにくい。上に述べたように、引力も斥力もバネのようなものなので、吸水膨潤は単結晶スケールでは可逆過程であり、体積歪は上載圧の変化とともに下の図2の曲線上を移動するのである。

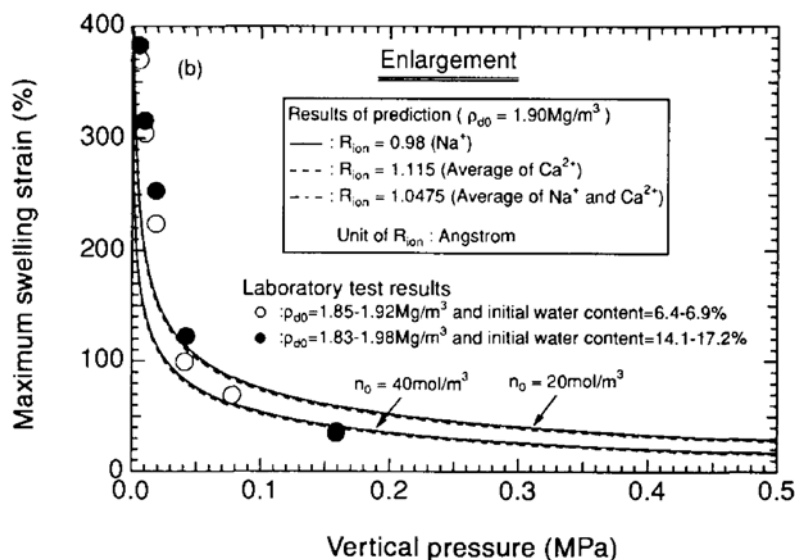


図2 ベントナイトに関する上載圧と膨潤歪との関係（Komine and Ogata, 1996）。  
曲線は理論値。

上述のことは単結晶のモンモリロナイトが単純に集合した場合のことである。大槻からのコメント(8)で紹介したように、実際には結晶の単層が 1~16 枚程度集合して tactoid と称される微粒子を作り、さらにそれらが集合してバルクのモンモリロナイトになっている。このような集合体は**階層的な孔隙構造**を持っているため、非可逆的な吸水・脱水挙動を示すことがある。その 1 事例は、相対湿度とともに変化する底面格子間隔の変化が**ヒステリシスループ**を描くという Cases et al. (1992)の実験結果であり、それは **mesopores での水分子の毛管凝縮が原因**であるとされている。

徳山(1986)によるモンモリロナイトの吸水膨潤の経路依存性も、バルクの組織に関係していると思われる。すなわち、彼が用いたのは 3cm 四方程度の大きな試料で、層間水が 1 層になるまで乾燥すると、試料の奥深くまで達する“ひび割れ”が生じ、これを水に漬けると体積が 2 倍以上にまで膨張するが、乾燥が 2 層の層間水が残る程度であると、膨張は僅かであったというのである。上に述べた単結晶スケールでの過程が可逆的であること、およびバルクのモンモリロナイトが backfill に利用されるほど不透水性であることに留意すれば、徳山(1986)の経路依存性は、水が試料の奥深くまで到達する時間が“ひび割れ”によって著しく短縮された結果であって、**層間水が 2 層の試料であっても、長時間水に浸しておけば、同様に著しく膨張するであろう。**

30 年も前に査読なしの論文集に書かれた徳山の論文 1 本に“膨潤”の全てを任せるのは危険なので、内外の関連論文をレビューするのが普通の科学の在り方である。

なお、常温常圧下では、ハロイサイトは 1 層の層間水を挟んで形成され（加水ハロイサイト）、それ以上の層間水は持てないので、さらに膨張することはない。

### 3. 岩盤劣化のヒストリーと膨張のストーリー

#### ・いつ劣化したのか？

第 11 回評価会合参考資料 5 によれば、基盤の劣化度 E と D の針貫入勾配は 1~10kgf/mm 程度である。これは“くさり礫”のそれ（西山ほか, 1999）と同程度である。他方、トレンチ壁面や水平掘削面の写真から判断するに、M1a の段丘堆積物中の礫の風化度は“半くさり礫”程度かそれより軽微な風化のようであって、風化度に明確に差がある。

理化学分析値から明らかだが、弱酸性天水環境下での化学風化度の指標であるハロイサイトは、劣化度 D, E の基盤はもとより、被覆第四紀層にも含まれる。しかし、後者に比べ前者では格段に多いのである。

上記 2 つは新たに指摘する事実で、**“岩盤劣化”のかなりの部分は、M1a 層堆積以前に既に終了していた**ことを端的に示している。

#### ・東通のモンモリロナイトは徳山の“II 層”を経験したことはない

徳山（1986）の実験結果を利用して作られた東北電力の“膨張”ストーリーの核心部は、海

退期に地下水位が低下したときに、本当にモンモリロナイトの層間水が 1 層になったのかということである。膨潤が起きていないことはすでに**実証済み**なのだが、大槻からのコメント（その 8）では膨張ストーリーさえも破綻していることが指摘されている。すなわち、① 加水ハロイサイトの層間水は常温乾燥空气中で失われ、一旦無水になると元にはもどれない（白水, 1998）。② 20℃では、例えば、相対湿度 60%では加水ハロイサイトの分率は 0.83 程度である（岡田・小坂, 1983）。③ 東通のハロイサイトは加水ハロイサイトである。これら 3つの事から、**東通のハロイサイトは生成以来現在までに 60%程度以下の相対湿度を経験したことがない**ということが導かれる。他方、常温常圧下での脱水過程では、相対湿度が 60%以下にならないと、モンモリロナイトの層間水は 1 層にならない（Cases et al., 1992）。したがって、**東通では層間水が 1 層だけのモンモリロナイトが作られたことは一度もなかったことになり、徳山（1986）の著しい膨潤もあり得なかった。**

#### 4. コロラドの heaving bedrock は東通の“膨張”の手助けにもならない

これまでコロラドの heaving bedrock に関しては何もコメントしてこなかった。その理由は、東通の“膨張”を理解するためには、原理的に何の役にも立ち得ないからである。しかし、これに捉われる人もいるようなので、放っておけない。

コロラドの heaving の原因は上載圧の減少（表層の掘削除去）と降水・散水である。上の 2 の項で述べたことから、これらがモンモリロナイトの吸水膨潤を結果することは明らかだ。他方、東通では弱酸性天水が浸透してモンモリロナイトや斜長石などを溶脱し、岩盤を多孔質化させた。残ったモンモリロナイトは水が多いときには膨潤したかもしれないが、1 の項で述べたように、それが孔隙を埋め尽くすこともなく、ましてや岩石全体を膨張させるまでには至らなかったのである。

力源の分布と強さが同じなら、同じような heaving の形態が生まれる。コロラドの heaving の波長はモンモリロナイト含有層、除荷、散水の広がりによって決定され、振幅はモンモリロナイト含有量、孔隙率、除荷量、散水量で決定されるだけのことである。したがって、コロラドと東通を比べたいなら、力源の分布と強さを比べなければならない。メカニズムが単純な場合には絵合わせが正解に導くこともある。しかし、**数個以上のパラメータで支配されている複雑な現象の場合には、絵合わせだけで正解に近づくのは難しい。**

\*\*\*\*\*

**非科学的ロジック：吸水膨張と活断層か否かは別個に証明しなければならない対象である**

「第四系変状」の一部には通常の活断層とみなし難い面もあるということが、「膨張もあるのではないか」という思いに繋がってしまっているようだ。それは、**吸水膨張という現象が活断層か否かという問題とは別個に証明しなければならない対象であるにも拘わらず、後者を理解する手助けに前者を使おうとしている**からである。これは明らかに科学的な方法ではないし、奇妙なことに一いや、当然にも一そのような思いにとらわれる人には粘土鉱物や吸水膨潤にかかわる知識

が乏しいように見える。冷静に見つめれば、そこに偶々“膨張”が転がっていたからそれを使おうとしただけであって、別のものが転がっていればそれを使うのではなかろうか。さらに大きな誤りは、粘土鉱物や吸水膨潤に関する知識が足りないと自ら告白しつつ、それをやっちゃっていることである。

**理解が至らないままに誤った最終評価を書かれたら、多くの人が迷惑を被る。** 分からない既知のことなら調べればよい。これまでに有識者会合で参照された“膨張”などに関する論文は、教養部程度の物理化学の知識があれば理解することができるし、教科書を読むなり最寄りの専門家に質問すれば理解が進む。有識者会合としてその道の専門家 2, 3 人に講義してもらえばなお効果的であろう。有識者会合の委員長の専門は岩石学なのだから、粘土鉱物や膨潤に関しては他の委員よりずっと精通しているはずで、その力を発揮して欲しい。

\*\*\*\*\*

## II 「第四系変状」は活断層か

### 1. 地下深部の未固結破砕帯は、新期断層活動によるもの

「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 断層の破砕部 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 の結果を得た。

表 1 固結、未固結、および両者混在の断層破砕帯に含まれる粘土鉱物の出現事例個数。

	固結	混在	未固結
セピオライト	14	6	1
パリゴルスカイト	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 から以下の事が言える。

- ① 固結破砕帯の 82%にはセピオライトが含まれ、モンモリロナイトは 5%に過ぎない。未固結破砕帯の 57%にはモンモリロナイトが含まれ、セピオライトは 7 試料の中の 1 個に過ぎない。固結/未固結混在の破砕帯の 56%にはモンモリロナイトが、22%にはセピオライトが含まれている。
- ② 固結破砕帯はすでに heal された古い断層破砕帯で、固結破砕帯の大部分にはセピオライトが含まれることから、古いこととセピオライトが含まれるということとの間に密接な関係があると考えられる。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。すなわち、固結断層は泊層の塩基性火山活動に伴われる変質作用の進行中に形成されたと推定される。

- ③ 未固結破砕帯と未固結/固結混在破砕帯には特徴的にモンモリロナイトが含まれる。

**まだ heal されていない未固結部を含む破砕帯は、固結破砕帯より新しいことは明らか**で、未固結破砕が固結破砕帯に重複したのが混在型の破砕帯である。

- ④ 以上のことから、モンモリロナイトを特徴的に伴い、まだ heal されていない破砕帯がより新期に（多分、第四紀の）形成されたことは、明らかである。これら新期の破砕帯のボーリングコア試料写真およびソフト X 線画像のほとんどに**剪断変形構造**が映し出されている。したがって、モンモリロナイトを含む破砕帯は新期の断層運動によって形成されたものである。

地表で観察される断層破砕帯の粘土には多量のモンモリロナイトを伴い、軟質である。これは地下の未固結破砕帯および混在型破砕帯の未固結部中の未固結部と同じ特徴であり、**全て新期（おそらくは第四紀）に形成されたものと結論される**。新期の断層運動が常に古い固結した破砕帯を利用するとは限らないので、あるボーリングコア試料に固結破砕帯しか認められなかったことをもって断層全体が新期に活動しなかったとは言えない。

## 2. 短くて「すぐ消える断層」, 「短波長のぼこぼこ」の成因

地表地震断層に関して、断層長  $L$  が 30 km 程度なら、平均すべり量  $U$  は 1m 前後、300 km であっても 4 m 前後である。断層近傍の平均歪  $U/L$  は前者なら  $3 \times 10^{-5}$  程度、後者なら  $1 \times 10^{-5}$  程度である。日頃このような地震断層を観察している人たちが、1m の変位量が 10m 程度の距離でゼロになってしまう  $s-9$  のような断層を見て不思議に思うのも無理はない。この場合の平均歪は  $10^{-1}$  程度だからである。

大槻は 2012 年 12 月 1 日付けのコメント（その 2）で、弾性媒質中のクラックモデルを引き合いに出し、 $U/L = C\Delta\sigma/\mu$ （ $C$  は断層幾何に関係した定数で、1 に近い量、 $\mu$  は剛性率）という関係があるので、大きな  $U/L$  は大きな  $\Delta\sigma/\mu$  で説明できるとした。東北電力からは  $\Delta\sigma$  は勿論のこと、 $\mu$  さえ明らかにされていない。そこで、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  $\mu$  は  $8 \times 10^8$  Pa と概算される。 $\Delta\sigma$  を 1MPa と仮定すれば、 $U/L$  は  $1 \times 10^{-3}$  程度になる。しかし、 $\mu$  が小さな岩石は  $\Delta\sigma$  も小さいだろうから、容易に  $U/L$  を小さくできないだろう。これはあくまで弾性論の枠内での大雑把な議論である。

次いで 2014 年 9 月 29 日付け大槻からのコメント（その 7）で、世界各地の堆積岩中で観察された地質断層の  $L$  と  $U$  の統計（Kim and Sanderson, 2005）を紹介した。それを参照すれば、 **$L$  が 10m 程度で  $D$  が 1m 足らず（すなわち、5m 離れただけで 1m の  $D$  が 0 になってしまう）** というような断層が**特異というわけではない**ことが分かる。その理由は、堆積岩類は程度の差はあれ、火成岩などよりはずっと大きな延性成分を有するからである。下の図

は入門的な教科書から引用した図で、延性度（破壊に至るまでの永久歪）とともに変わる模式的な変形様式と応力-歪曲線が示されている。延性的な岩石は降伏点を過ぎてから破壊し、その時の延性度は10%を超えることもある。

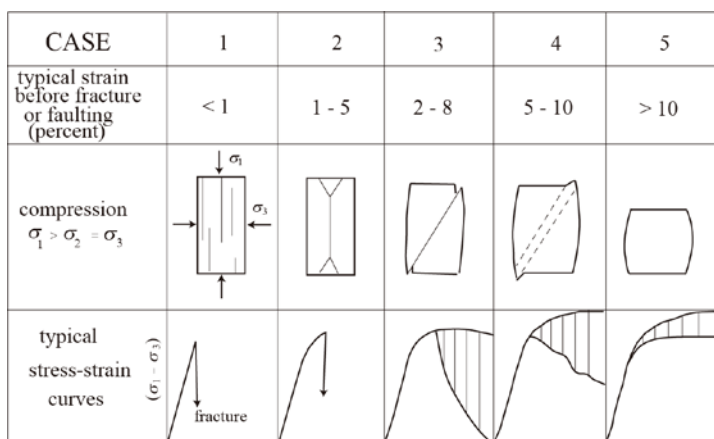


図3 脆性から延性変形に至る変形と応力-歪曲線の系統的な変化。

東通の岩石の強度などに関するデータは提出されていないので、桑原（1984）を用いてP波とS波速度から1軸圧縮強度を推定すれば、岩盤劣化度DとEでは3MPa程度と非常に小さい。これと強度が近い鮮新統竜の口層の凝灰質細粒砂岩に関する変形挙動の封圧と含水率依存性を調べた実験がある（大槻ほか，1974）。水に飽和すると、常圧の場合を除いて封圧が4~16MPaの範囲では、封圧によらず降伏応力がほぼ一定（約9MPa）で、歪硬化係数がほぼゼロの完全塑性体（正確にはSt. Venant物体）の挙動を示す（図4）。

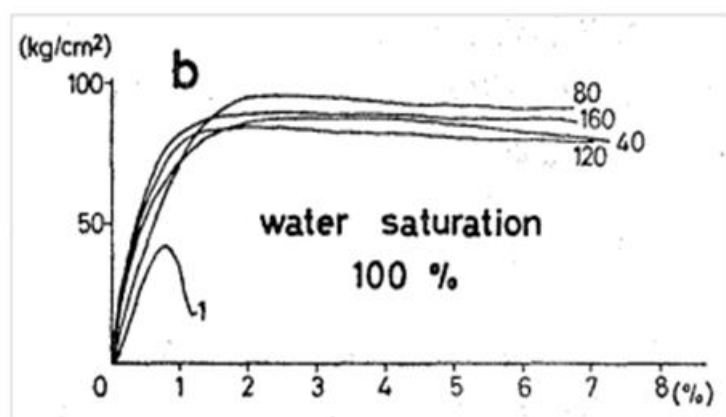


図4 水に飽和させた鮮新統竜の口層産凝灰質細粒砂岩に関する応力-歪曲線の封圧依存性（大槻ほか，1974）。

この実験では、常圧の場合は歪1%弱でゆっくりと破壊し、封圧4MPaではもはや完全塑性体的になり、歪が7%程度まで達しても破壊しない。封圧がこの中間のある値のときには、



歪 7%を超えてから延性的に破壊し得るものと思われる。植村（1982）によれば、下部鮮新統西山層泥岩は常温で  $10^{13} \sim 10^{14}$  Pas の粘性成分を持っている（これは地殻本体より数桁小さい）。粘性成分があれば、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容易に格段と大きくなり得る。上に述べたことから、「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、強く風化された**媒質が延性的であることが原因**である。

東通の風化された岩盤が延性的であることは、基盤上面に注目して小逆断層を観察すれば、それらがしばしば延性的変形を伴っていることから示唆される。また、基盤上面は波長 10~40m 程度で緩く undulate していて、それが小断層に伴うように見えたり、逆に undulation に小断層が伴うように見えたりするのである。これらのことは、東通の風化岩盤が確かに延性的な変形成分を持っていることを示している。Undulation の軸方向は合い伴う小逆断層の方向とほぼ同じであることは、トレンチの向い合う壁の観察から分かる。既に分かっているように（大槻からの 2014 年 3 月 13 日付けコメント（その 4）、2014 年 12 月 1 日付けコメント（その 8））、逆断層性小断層は走向が NS~NE のものが圧倒的に卓越し、小数の EW~WNW のものを伴っていて、上記の undulation の方向も同様であるように見える。したがって、これらの undulation は褶曲とみなされよう。

小断層は深度方向にもあまり伸びないものが多いようだが、これは単に小さい断層が多いということによる。大槻からの 2014 年 12 月 1 日付けコメント（その 8）で明らかにしたように、①東通敷地内に分布する断層のサイズはべき分布し、フラクタル次元が 1.6 と比較的大きい。②一般に、サイズ分布のフラクタル次元の大きいということは、媒質が延性的であることを示唆する。③このサイズ分布は、敷地内に数千個の小断層があり、最大級の断層であっても、その変位量は 6, 7m であることが示唆されるのである。③のことから、**敷地内を無作為に探索すれば、たくさんの小さな断層に遭遇し、断層が小さいのだから、地表で見つけられた断層が地下に向かって消滅する確率が圧倒的に高いのである**。したがって、『下に向かって消滅する』ことも当然であって、“膨張”などを持ち出すまでもない。

## おわりに

元々さしたるデータも理論も無いままに提案された“体積膨張説”に、東北電力自身もその評価に関わった専門家も幻惑され続けたようだ。風化による密度減少を全て“膨張”のせいにしたことから始まり、“モンモリロナイトの吸水膨張”、“ハロイサイトの結晶成長力による膨張”、そして最後に“メカニズム不明だがとにかく風化による膨張”と流転し続けた。すべてが作り話のオンパレードであることが明らかになった今、その呪縛から解放されて澄んだ目で再度全データを吟味すれば、真実を見通せるのではなからうか。

・断層破砕帯の粘土注入ーモンモリロナイトの膨張かテクトニックな水平応力で絞り出

- されたかは別にして一を差し引いた残りの変位分布はどのようなものになるのか？
- そのような処理を施した F-3 や F-9 はマスター断層らしき姿なのか？マスター断層はどこかに伏在しているのか？そもそもマスター断層はあるべきなのか？
  - F-9 の東に広がる地形的高まりの成因は何か？
  - そもそも活断層は古い断層を忠実に利用して活動しているのか？
  - 当初から重要視されてきた観測点の 4 割程度に“第四系変状”が見つかるという異常さは、何を意味するのか？
  - 活断層だけでなく、undulation（延性変形）を含む全歪量はどの程度大きいのか？
  - 地表は延性的に短縮すれば、地殻全体も同じ程度に短縮するはずだが・・・
  - 2012 年 12 月 1 日付けの大槻からのコメント（その 2）で問題提起された小規模な“歪集中帯”は妥当なのか？
  - 延性的断層が滑るときの速度は？
  - この地域で地震発生が発生するポテンシャルはどの程度か？
- .....

\*\*\*\*\*

事前会合では

『この会合で必要なのは科学的な判断です。そのみが重要です。』

『純粋に科学的な御判断を・・・・理由を挙げた上で・・・・はっきりお示しいただきたいと思います。』

『科学者として、当然御判断には責任が生じることになります。万一、科学的でないような御判断をされた場合には糾弾されることになるかと思えます。』

と述べられている。

第 12 回評価会合での評価（案）の内容のままでは、糾弾され、裁判では確実に負け、地学と地形学に対する信頼性は地に落ちるでしょう。

\*\*\*\*\*

## 引用文献

- Cases, J.M., Berend, I., Besson, G., Francois, M., Uriot, J.P., Thomas, F., and Poirier, J.E., 1992, Mechanism of adsorption and desorption of water vapor by homoionic montmorillonite. 1. The sodium-exchanged form. *Langmuir*, **8**, 2730-2739.
- Chen, T. and Lapusta, N., 2009, Scaling of small repeating earthquakes explained by interaction of seismic and aseismic slip in a rate and state fault model. *J. Geophys. Res. Lett.*, 114, B01311.
- Komine, H. and Ogata, N., 1996, Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Can. Geotech. J.*, **33**, 11-22.

- Komine, H. and Ogata, N., 2004, Predicting swelling characteristics of bentonites. *J. Geotech. Geoenv. Engin.*, **130**, 818-829.
- 桑原啓三, 1984, 岩石の圧縮強度と剪断強度による分類の試み. 応用地質, 特別号, 25-33.
- Nadeau, R. M. and Johnson, L. R., 1998, Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 790-814.
- 西山賢一・横田修一郎・岩松 暉, 1999, 扇状地堆積物における赤色化礫の分布と性状. 応用地質, **40**(1), 2-13.
- 岡田 清・小坂丈予, 1983, ハロイサイト鉱物の層間水の脱水機構. 窯業協会誌, **91**, 329-334.
- 大槻憲四郎・永広昌之・北村 信, 1974, 岩石物性に及ぼす孔隙水の影響. 地質学雑誌, **80**, 391-395.
- Pe-Piper, G., Karim, A., and Piper, D.J.W, 2011, Authigenesis of titania minerals and the mobility of Ti: New evidence from pro-deltaic sandstones, Cretaceous Scotian basin, Canada. *J. Sed. Tes.*, **81**, 762-773.
- 白水晴雄, 1998, 「粘土鉱物学－粘土科学の基礎－」. 朝倉書店
- 徳山 明, 1986, モンモリロナイトの4相と大規模地すべりの機構. 北村 信教授記念地質学論文集, 571-586.
- 植村 武, 1982, 岩石の高圧3軸試験と天然の変形速度. 月刊地球, **4**, 31-38.