

第11回評価会合を踏まえて：コメント（その8）

東北大学名誉教授 大槻憲四郎

平成26年10月27日開催の標記会合に提出された資料と質疑を踏まえ、1～3にモンモリロナイトの吸水膨潤、4と5に断層に関わるコメントを述べた。末尾に「参考」としてモンモリロナイトの吸水膨潤理論の要約を紹介した。お役に立てれば幸いである。

1. スメクタイトの吸水膨潤は可逆過程か？

標記の件は『変状をもたらす力の源がモンモリロナイトの吸水膨潤だ』との東北電力の主張の核心部のひとつを構成している。第11回会合でも問題となったが、「膨潤は progressive な過程である」とか「粘土鉱物のレベルでは可逆的である」とか、曖昧なままである。後で扱う問題にも関係するので、まずこの件を吟味することから始める。

可逆過程とは、『ある状態が別の状態に変化する時、熱と仕事を逆にして同じ経路をたどって元の状態に戻すことができ、しかも熱と仕事をやり取りした周囲に何の変化も残さない過程のこと』である。

末尾の「参考」に紹介してあるように、モンモリロナイトの吸水膨潤を支配する力は、クーロン力（あるいは電気二重層の電場）とファンデルワールス力であって、その限りでは吸水膨潤は可逆過程のはずである。ところが、事はそう単純でないようである。

Cases et al. (1992) は精製した Wyoming Na-モンモリロナイトを用いて大気中での水の

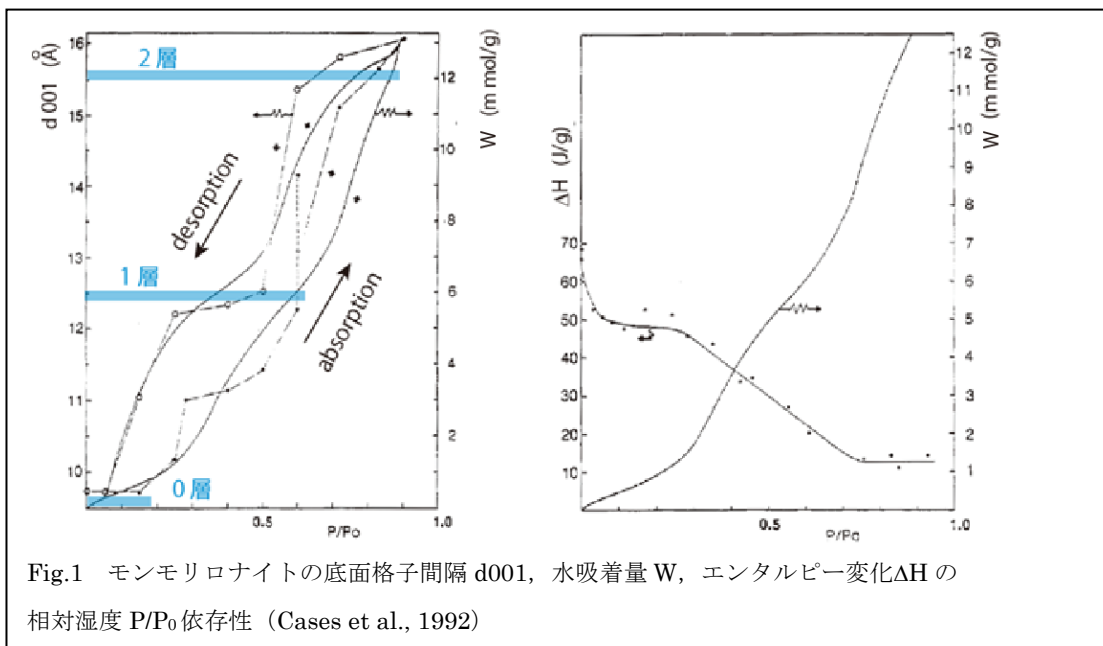


Fig.1 モンモリロナイトの底面格子間隔 d_{001} , 水吸着量 W , エンタルピー変化 ΔH の相対湿度 P/P_0 依存性 (Cases et al., 1992)

吸着/脱水実験を行った。吸着量は温度一定の条件下での圧力（水の蒸気圧）の関数として表わされることが多い（吸着等温線：adsorption isotherm）。Fig.1の横軸 P/P_0 は所与の水蒸気圧を飽和蒸気圧で規格化した相対湿度である。左側の図の実曲線が吸着等温線（吸着量は W ）で、折線は底面格子間隔 d_{001} の変化を表わしている。なお、図中の青線は層間水が無い場合、1層の場合、2層の場合の底面格子間隔である。

一見して分かるように、吸着量も底面格子間隔も、吸着過程と脱水過程がヒステリシスループを描いていて、吸着過程でのある状態は脱水過程では 0.2 ほど小さい P/P_0 で実現する。従って、これは**不可逆過程**である。

ヒステリシスループの原因は何か。モンモリロナイトなどのスメクタイトの中には、Fig. 2 に示したように、macropores, micropores, interlayer pores などの階層的な孔隙構造がある (Yong, 1999)。日本化学会 編 (2002) によれば、一般に吸着は個体表面の構造と吸着機構によって I~VI の型に分類されていて、上記のヒステリシスループは、IV 型に特徴

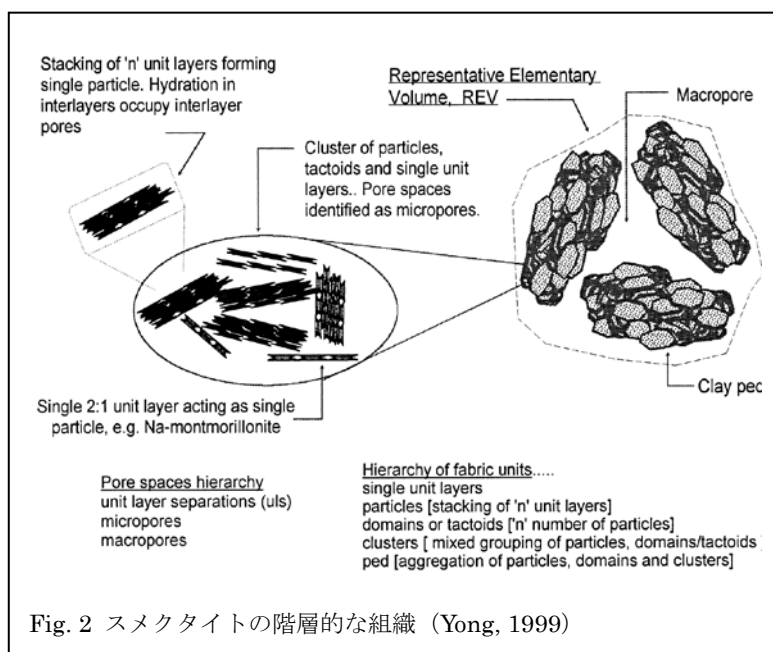


Fig. 2 スメクタイトの階層的な組織 (Yong, 1999)

的であるという。IV 型には mesopore (2nm~50nm) の表面構造が特徴的で、吸着機構は孔隙表面への毛管凝縮 (capillary condensation) である。Mesopore 内の水分子は孔隙の個体表面にファンデルワールス力で拘束されるので、その分だけ水分子は凝集し、バルクの水蒸気より安定である。脱水過程ではこのファンデルワールス力分だけの余分の力（ここではより小さな P/P_0 ）が必要なので、ヒステリシスループを描くことになる。すなわち、Cases et al. (1992)による実験で見られた不可逆過程の原因は、モンモリロナイト結晶そのものにあるのではなく、それらの集合体の構造にあるようだ。

2. 『著しい吸水膨潤は、II 相を経験して III 相になった時にのみ起こる』は本当か？メカニズムは？

徳山 (1986) によるモンモリロナイトの“I 相”，“II 相”，“III 相”，“IV 相”は、底面格子間隔から判断すると、それぞれ層間水が 2 層，1 層，3 層以上，無しの状態であるに過ぎ

ないので (大槻のコメント (その7)), 今後それぞれを w2-M, w1-M, w>3-M, w0-M と略記する. 徳山 (1986)の鍵となる主旨は、『w2-M 試料を水漬してもさしたる膨張は起きないが, 乾燥させて一旦 w1-M にした試料を水漬すると体積が 2 倍以上に膨張する』ということである.

徳山 (1986) の論文には吸水膨潤実験の装置の詳細や湿度制御の精度などが記述されていないし, 試料の密度としてはあり得ない “3.70g/ml” という値も記載されている. また, 『可動の上蓋に重量をかけると, ある程度の封圧を加えることができ, 地下水状態が復元できる』とか, 『固体試料は伸縮性のあるエラスティックバンドに包み, 砂及び水と境させた』と記述されているが, 上蓋にかけた重量, エラスティックバンドの試料に対する拘束力, それらの実験結果に対する影響などが記述されていない等々, 彼の主張を正しく理解するための情報が足りない. しかし, ここでは『w2-M 試料を水漬してもさしたる膨張は起きないが, 乾燥させて一旦 w1-M にした試料を水漬すると体積が 2 倍以上に膨張する』ことは事実であるとし, それは何故かということ进行を考察する.

上の Cases et al. (1992) の研究は, 大気中での水の吸着実験であったが, Zhang and Low (1989)は同じ Wyoming モンモリロナイトを精製し, その粉の水浸吸着実験を行った. 彼らの実験は, 質量測定, Calvet differential microcalorimeter, 湿度制御チャンバーの付いた X 線回折装置などを使用し, 高精度で heat of immersion Q (発熱によるエントロピー変化 ΔH は負), 含水比 m_w/m_c , 底面格子間隔を計った. Fig.3 と Fig.4 がその結果の一部である.

Heat of immersion (浸水熱) Q は含水比 m_w/m_c が 0 付近での約 50 J/g から m_w/m_c の増加とともに急速に減少し, m_w/m_c が 0.4 あたりで 0 に近くなる (Fig.3a). この種の他の実験では m_w/m_c の増加とともに Q は単純に 0 に漸近するものと思われてきたが, Zhang and Low (1989)の実験が精緻であったため, m_w/m_c が 0.4~0.8 の領域では Q が負 (吸熱反応) になり, 非常に浅いエネルギーの谷を作っていることが見つかった (Fig.3b).

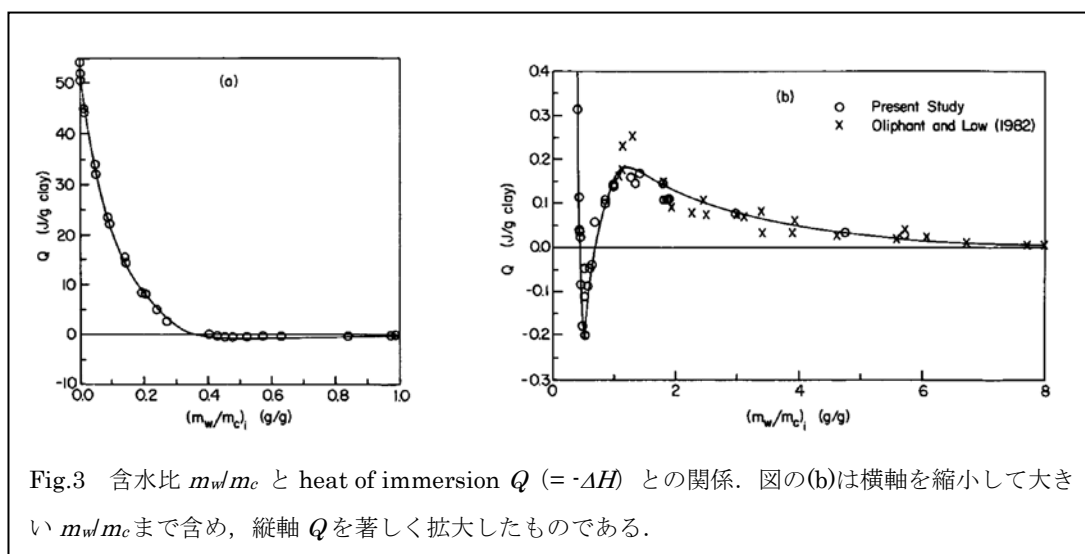


Fig.3 含水比 m_w/m_c と heat of immersion Q ($= -\Delta H$) との関係. 図の(b)は横軸を縮小して大きい m_w/m_c まで含め, 縦軸 Q を著しく拡大したものである.

興味深いことに、この谷から右側のピークまでの m_w/m_c の領域では底面格子間隔は 1.89 nm と 3.07 nm の値のみをとる (Fig.4). すなわち、格子間隔は一旦 1.89 nm (3層の層間水に相当) になると、つぎはジャンプして拡張し、3.07 nm になるのである。底面格子間隔から層間間隔を除いた厚さは 0.93 nm なので、層間水が 3層から一気に 6~7層に増加したことに相当する。

上記の底面格子間隔がジャンプして増加するのは、以下のような理由である。互いに向かい合う四面体シートにはファンデルワールス力が作用し、四面体シートと交換性陽イオンとの間にはクーロン

力が働いていて、ともに引力である。そのため、向かい合う四面体シート同士を引き離し、さらに陽イオンを四面体シートから解離させるためには、エネルギーが必要である。他方、負に帯電している四面体シート表面の酸素と交換性陽イオンは水和され、その時には斥力が発生する。これらの水和に伴ってエネルギー (水和熱) が解放される。Fig.3 に示されている $Q < 0$ の浅い谷を除けば、吸水膨張過程では解放されるエネルギーが必要とされるエネルギーより大きく、発熱過程であり、吸水膨張は自発的に進行する。 $Q < 0$ の谷ではエネルギーが供給されなければ吸水膨張は進行しない。この実験は定温条件下で行われているため、系の外から必要な熱エネルギーが供給され、斥力が引力を凌駕すると、底面格子間隔はジャンプして増加する。ジャンプした後は再び発熱過程であり、 Q (と正味の斥力) が漸減しつつ、吸水膨張は弱々しいながら自発的に進行し、ついには分散状態に至る。

$Q < 0$ の谷底から次のピークまでの Q の大きさは 0.4 J/g (水の比熱容量の約 1/10) に過ぎないので、わずかなエネルギー供給でもこの谷は易々と越えられる。自然界の場合、地下は無限の熱浴であり、吸水膨張は実験と同様に進行する。この浅い谷の存在は徳山の $w1-M$ から $w>3-M$ への“相転移”に伴う著しい膨張のメカニズムを説明するかのように見える。しかし、著しい膨張が $w2-M$ から $w>3-M$ への“相転移”では起きないことを説明できない。“著しい膨張”の経路依存に関しては、何か別の原因を考えなければならないように思える。

そこで、“著しい膨張”が起きたのが約 3cm 角の固体試料を水漬した時であったことに注目する (通常この種の実験では、精製した 1g にも満たないモンモリロナイトの粉を使う)。徳山も述べているように、著しい膨張は乾燥・収縮して $w1-M$ になるときにひび割れが伴われることに関係しているのかもしれない。堆積岩の場合にはひび割れが層理面に平行で、これに直交する P 波速度は 2.3 km から 0.7 km に激減する例もあるという。これほどの速度減少は、ひび割れが固体試料の奥深くまで及んでいることを示唆する。Fig.2 に示したように、元来スメクタイトの中には階層的な孔隙構造があるという。乾燥に伴う変形によって

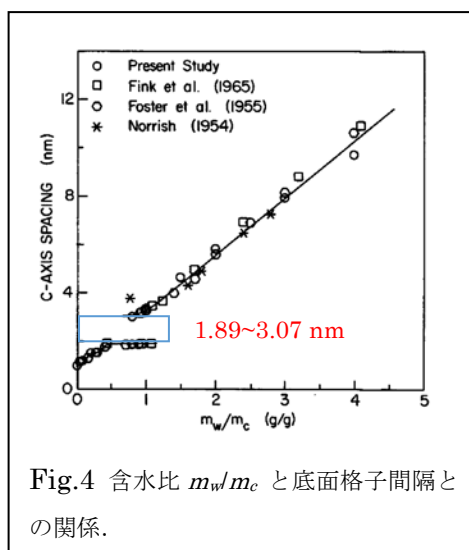


Fig.4 含水比 m_w/m_c と底面格子間隔との関係.

これらの孔隙の構造が変化するのではなかろうか。例えば、各階層の孔隙の連結度が著しく増加するとともに、水と接する有効比表面積が著しく増加するなど。そのような孔隙構造にさらにひび割れのような“megapores”が加われば、“megapores”から interlayer pores へと続く通路のネットワークが形成されるのかもしれない。そうすれば、水は試料の奥深くまで速やかに浸透し、水の吸着速度（したがって膨張速度）はなお一層大きくなるであろう。

他方、w2-M の試料には目に見えるようなひび割れが無いらしい。そのために水の浸透速度が遅く、短い時間では著しい膨張が観測されないのかもしれない。実際、徳山（1986）によれば、w2-M の原岩試料 30 mm 角を水蒸気飽和槽に保存しておき、それを 3 日間水浸しておいても、w2-M に相当する底面間隔のままであったということだが、このことは孔隙構造の破壊から免れている w2-M には水が容易に浸透しないことを示唆しているのかもしれない。すなわち、w1-M を経て $w > 3-M$ になるもののみが著しく膨張するという現象は、単に w1-M になるときの乾燥によって粘土の塊にひび割れを含む構造が形成されるためである可能性が考えられる。精製したモンモリロナイト粉の膨張は、これを前もって圧密する圧力（すなわち乾燥密度）に強く正相関するというような実験結果がある（例えば、Villar and Lloret, 2008）。このことも膨張に関する孔隙構造の重要性を示唆する。

3. 東通りの地下は徳山の II 相（1 枚の層間水）が生成したことはなかったようだ

東北電力は徳山（1986）の実験結果に基づいて“膨張”のストーリーを作った。すなわち、『海進に伴って M1 段丘堆積物が堆積している間 (5e) は地下水位が高かった。海退 (5d) とともに地下水位が低下し、地下水位より上の基盤岩の風化が進行し、乾燥した。そのため、原岩に含まれていた w2-M のモンモリロナイトは w1-M になった。その後の再度の海進 (5c) とともに地下水位も上昇し、地下水に浸された w1-M は $w > 3-M$ になり、著しく膨張した。』というわけである。

標記の本題に入る前に、上記のストーリーには M1 段丘堆積物が堆積する前の事が含まれていない。M1 の前には長いリス氷期があり、上記ストーリーの 5d→5c と同様の過程がリス氷期→5e でも進行したはずである。すなわち、リス氷期で表層が風化し、乾燥によって w1-M が出来、M1 の 5e (5e の前期というべきか) には w1-M が $w > 3-M$ になり、著しく膨張したはずである。“変状”の時期にとってはそれで特に問題は生じない（東北電力のストーリーとは異なるが）。しかし、これでは $w1-M \rightarrow w > 3-M \rightarrow w1-M \rightarrow \dots$ となり、“著しい膨張”の後は“著しい収縮”になり、これが繰り返すことになるので、東北電力の主張にとっては不都合である。

では、表層風化はリス氷期にも実際起きたのか？ これは明らかに“yes”である。第 9 回

有識者会合で配布された資料「理化学分析結果」の添 I-67~73 によれば、ハロイサイトは基盤岩劣化部だけでなく、第四系（最上部の F3 扇状地堆積物まで）にも含まれるが、含有量には明瞭な差がある。このことは、基盤岩の風化とハロイサイトの生成は M1 面段丘堆積物以後にも進行したが、それらの主要部分は M1 面段丘堆積物の堆積前にすでに終了していたことを示唆する。東北電力のストーリーのように、これらが M1 面段丘堆積物の後にのみ起こったと限定することは誤りである。

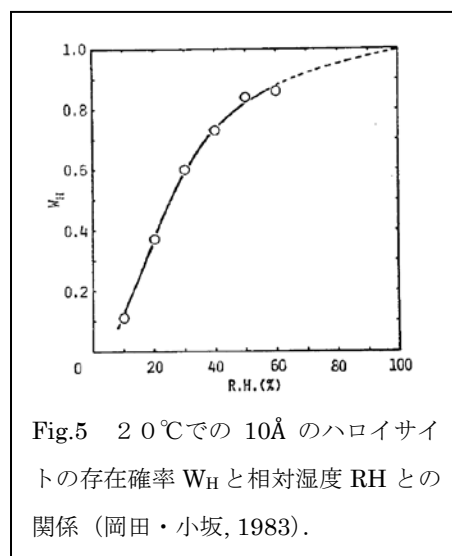
最後に、「w1-M が形成されるほどまでに地下が乾燥したことが、実際にあったであろうか」という鍵となる問題を検討する。そこで、まずハロイサイトに注目する。ハロイサイトは 1:1 型の粘土鉱物で、1 枚の層間水を含み得る（加水ハロイサイト）。層間水は脱水し易く、常温乾燥空气中で失われ、一旦無水になると元にはもどれないという（白水, 1998）。Fig.5 に 20°C での加水ハロイサイト分率と相対湿度との関係（岡田・小坂, 1983）を示す。例えば、相対湿度 60% では加水ハロイサイトの分率は 0.83 であるという。

ところで、東通のハロイサイトの X 線回折角 2θ は約 8.7° なので加水ハロイサイトであり、ピークの形は無水ハロイサイトがほとんど含まれていないことを示唆する。すなわち、東通のハロイサイトは M1 面段丘堆積物の堆積以前に形成され始めて以来、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になる。他方、Fig.1a に示したように、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。これらのことは、東通では w1-M が作られたことは一度もなかったことを強く示唆する。 そもそも、地下数 m の湿度が 60% 以下なら、植物はほとんど生えない。東通がそんな環境になったことがあるというのだろうか？

以上の事を、モンモリロナイトからも検討する。

Fig.3 を用いて既に述べたように、 m_w/m_c が 0.4~0.8 の領域で Q が負なる。東北電力の言うように、w1-M

から $w>3-M$ となったモンモリロナイトが乾燥するときには、 Q の谷に右から近づく。谷は 0.4 J/g 程度と非常に浅いので、無限大の熱浴を備えた地下でこれを乗り越えるのは容易である。乗り越えた直後は 3 層の層間水を持つモンモリロナイトである。この過程で $w1-M \rightarrow w>3-M$ に伴う“著しい膨張”とは逆に、これに匹敵する収縮が起きるはずである。しかし、東北電力からはそのような収縮を示唆するような現象は示されたことはない。このことは $w1-M \rightarrow w>3-M$ の変化が元々起こらなかった、すなわち w1-M のモンモリロナイトが形成されたことはなかった と考えた方がよいのである。



徳山の論文は 30 年ほど前に書かれたものだが、これだけに依拠するのは危うい。スメ

クタイトに関してはその後も多くの研究がなされてきたが、最近ではナノ材料、機能性材料、コロイド化学などの方面での研究が盛んである。東北電力はそれらをレビューし、最新の知見を基にして東通の“膨張”を再検討すべきである。

地表から地下水位面までの領域における湿度は、気象の変化に対応して変化し、長雨が続けば孔隙の固体表面はバルクの水で覆われることもあるだろう。地下水位面から地表までの原位置での湿度変化を1~2年程度連続観測し、w1-Mを生成するような低湿度になるときがあるのか、w1-Mが水に飽和した時には $w > 3 \cdot M$ になって著しい膨張が起こるのかどうかを実証するのも真実に近づく一つの方法かもしれない。

4. 方向別断層頻度に対するトレンチの卓越方向によるバイアス

敷地内で観察された小断層は走向がNS~NNEの逆断層とNW~EWの逆断層の2グループがある。前者は、東北電力から提出された資料「東通・現調12-2」の4-1(2)-6に掲載されている応力多重逆解析法の結果のうち、オレンジ色の○、☆、および△で表示されている主圧力軸に対応する小断層集団であり、後者は赤い□で表示された主圧力軸に対応する小断層集団である。2つの断層集団のうち、NS~NNEの逆断層が圧倒的に多く、NW~EWの逆断層はずっと少ないのだが、このような方向別卓越頻度には断層を観察したトレンチの卓越方向のバイアスがかかっているとの指摘は当然である。

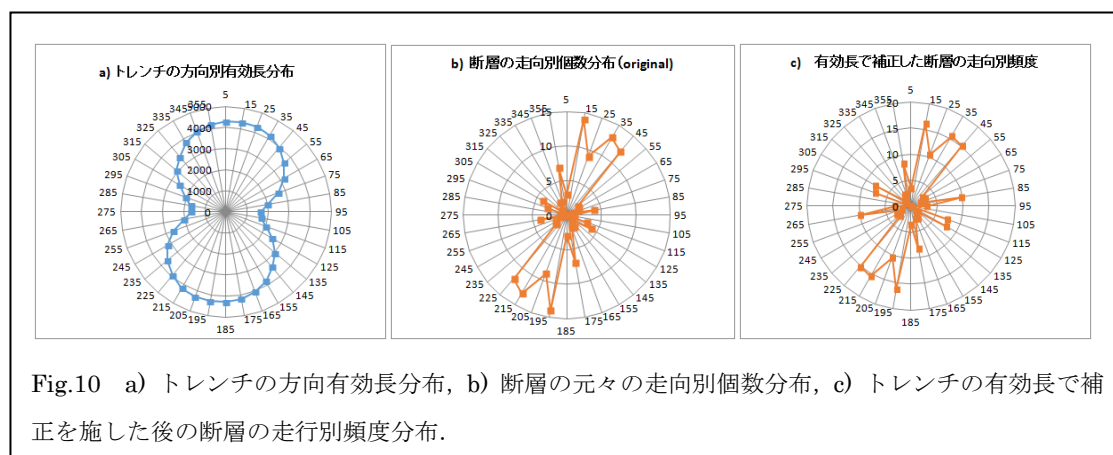


Fig.10 a) トレンチの方向有効長分布, b) 断層の元々の走向別個数分布, c) トレンチの有効長で補正を施した後の断層の走向別頻度分布.

そこで、トレンチの平面図とそこで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、それら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（断層の走向を想定）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.10a である。Fig.10b 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.10c 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る。

5. 断層のサイズ分布が示唆すること

第 11 回評価委員会において東北電力から提出された資料「東通・現調 12-2」の 4-1(2)-15 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.11 にはそのデータを用いて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、それ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。フラクタル次元は 1.6 程度で、他地域の新第三系中のテクトニックな小断層のそれら（例えば、Otsuki, 1998）と変わるところはなく、相対的に延性的な断層集団に属する。

ところで、断層を観察したトレンチの面積は敷地の 30 倍程度（概算値なので、正しくは東北電力で算定して欲しい）なので、積算個数を 30 倍したときの変位と積算個数との関係を茶色の菱形で示した。この図は、敷地内には数千個の小断層が発達していて、その中の最大の断層の変位量は 6, 7m 程度であることを示唆している。

これらの断層によるマクロな歪量も大変大きくなると思われる。全観察地点の 40% 程度に“変状”が認められるという看過できない事実認識は、当初から東北電力にもあった。

今では“粘土鉱物の膨潤による変状”は一部を除いて根拠のない作り話であることが分かっているので、地下浅部だけ歪んでいると考えるわけにはいかない。2012 年 12 月 1 日付けの大槻のコメント（その 2）の 5 には、F-3 と F-9 に挟まれた地帯はそれらが正断層として活動した中新世には小規模な歪集中帯であり、それが第四紀に至っても完全には heal していき、依然として歪集中帯ではなかろうかと問題提起した。上の断層変位の累積個数分布からの統計的推測は、改めてこの問題の重要性を示唆している。栗田氏は歪を求めることを東北電力に要求してきたが、それは上の視点からも重要である。

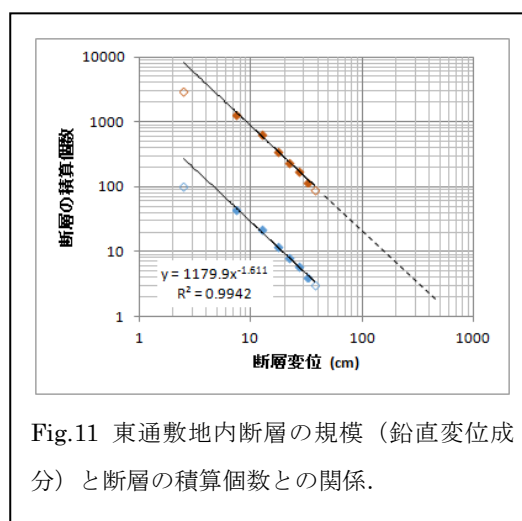


Fig.11 東通敷地内断層の規模（鉛直変位成分）と断層の積算個数との関係。

6. 結論

1) モンモリロナイトの吸水/脱水過程は不可逆過程を含んでいる。そのひとつは mesopore

表面への毛管凝縮であり，他のひとつは層間水が3層から6 or 7層にジャンプすることに関係している。

- 2) 『層間水が1層の状態を経験した後に吸水したモンモリロナイトのみが著しく膨潤する』という徳山(1986)の実験結果は，乾燥によって固体試料にひび割れが生じるなど，マイクロからマクロまでの構造改編が原因かもしれない．徳山(1986)の実験結果だけに拘らず，最近の研究を広くレビューすべきである．
- 3) 乾燥過程で層間水が1層のモンモリロナイト層が出るのは，相対湿度が約60%以下になったときである．他方，この湿度ではハロイサイトは無水になるが，現在あるハロイサイトは加水ハロイサイトである．したがって，東通でモンモリロナイトの層間水が1層になったことはなく，したがって徳山の言う『著しい膨張』もあり得ない．
- 4) 断層の方向別頻度分布はトレンチの多くが東西に近い方向であることによるバイアスを受ける．しかし，このバイアスを補正した後も頻度分布の基本的特徴は変わらない．
- 5) 敷地内断層の規模（変位の鉛直成分）別累積頻度分布はフラクタル的で，他地域の堆積岩中に発達するテクトニックな小断層集団と基本的に同じである．この頻度分布から，敷地内には数千個の小断層があると推定され，その中の最大規模のものの鉛直変位は6, 7 m程度と予想される．

【参考】スメクタイトの膨張のメカニズム

80年も前に Langmuir が膨張は**拡散二重層**（diffuse electric double layer）の存在と関係して起こることを指摘して以来，この指摘に沿った研究がおこなわれてきた．スメクタイトは1枚の八面体シートを2枚の四面体シートが挟む2:1層をなしている．八面体シート中の Al^{+3} が Mg^{+2} などに，四面体シート中の Si^{+4} が Al^{+3} などに**同形置換**し，シート全体では正の電荷が不足し，四面体シートの表面は負に帯電する．そのため，四面体シート表面には Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などの陽イオンが引き寄せられる．水の一部はこれらの陽イオンの周りに水和殻を形成する．四面体シート表面近傍では陽イオン濃度が高く，向かい合うシートの間に向かっては陰イオンの濃度が高くな

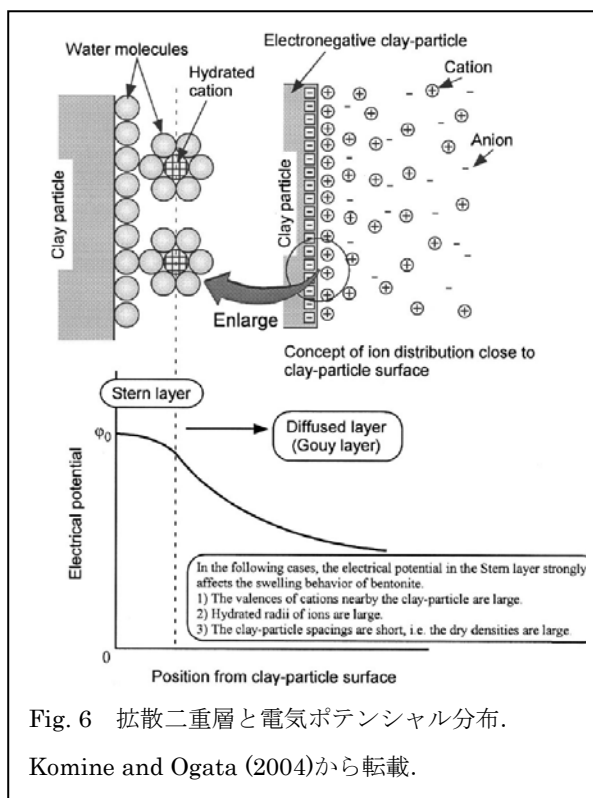


Fig. 6 拡散二重層と電気ポテンシャル分布.

Komine and Ogata (2004)から転載.

る。これが**拡散二重層**と呼ばれているものである (Fig.6)。

上記のような電荷分布によって四面体シート間のスペースには電場が形成される。この電場に関する代表的なモデルが Gouy-Chapman による**電気二重層**の理論である。向かい合う 2つの 2:1 層の表面から広がる電場が重なり合うと、以下のような**斥力** f_r が発生する (Fig.7, Komine and Ogata (1996, 2004))。

$$f_r = 2nkT(\cosh u - 1)$$

$$u = 8 \tanh^{-1} \left[\exp \left(-\sqrt{\frac{2n\nu^2 e^2}{\epsilon kT}} d \right) \tanh \left(\frac{z}{4} \right) \right]$$

$$z = 2 \sinh^{-1} \left(96.5 \times \frac{\text{CEC}}{S} \sqrt{\frac{1}{8\epsilon nkT}} \right)$$

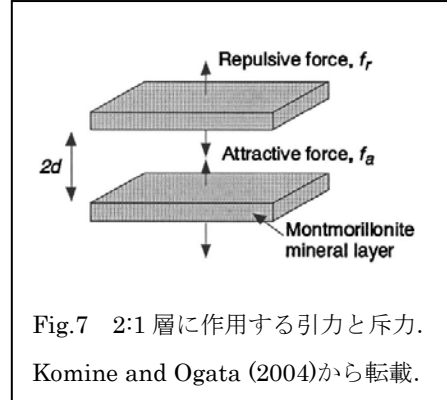


Fig.7 2:1 層に作用する引力と斥力。
Komine and Ogata (2004)から転載。

d : 向かい合う 2:1 層の間隔の半分, ν : イオン価,
 e : 電気素量, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度, n : 間隙水のイオン濃度, ϵ : 間隙水の誘電率, CEC: 陽イオン交換容量, S : ベントナイトの比表面積

他方, 引力 f_a は以下のようなファンデルワールス力であるとされている。

$$f_a = \frac{A_h}{24\pi} \left[\frac{1}{d^3} + \frac{1}{(d+t)^3} - \frac{2}{(d+t/2)^3} \right]$$

t : 2:1 層の厚さ, A_h : ハマーカー数。

2:1 層に作用する圧力 P は $f_r - f_a$ である。

上記の式に基づいて Komine and Ogata (1996) が計算した斥力と引力の一例を Fig.8 に示す。特徴的なことは、斥力が引力を圧倒し、その斥力も層間隔が 40\AA ともなれば、 20\AA のときの $1/6$ までも急減するということがある。したがって、スメクタイトは層間水が 3 層あたりまではある程度硬いが、4 層あたりからは急激に柔らかくなり、ついには**分散状態**になる。層間水の層数が多くなれば P はゼロに近くなるので、**等エンタルピー過程**に近づく。

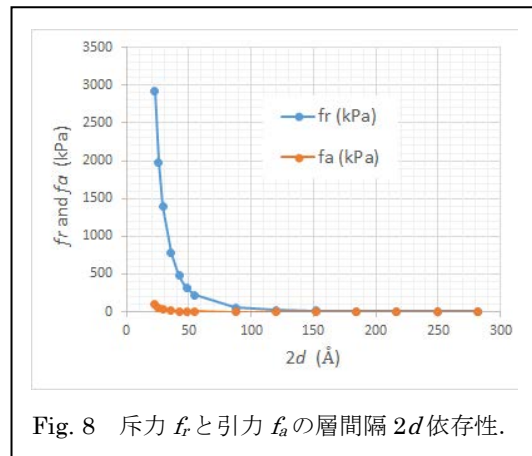


Fig. 8 斥力 f_r と引力 f_a の層間隔 $2d$ 依存性。

分子動力学を用いた数値シミュレーションも最近の有力な研究方法となっている。2 原子間の相互作用ポテンシャルエネルギーを表わす経験的な **Lennard-Jones potential**, およびそ

れに関与する原子の電荷に関する種々のモデルを組み合わせ、層間の陽イオンと水分子の配置に関して **Grand-Canonical Monte Carlo (GCMC)**シミュレーションを行い、X線回折、中性子線回折と比較しつつ、cross-check するという研究がなされている（例えば、Ferrage et al., 2011）。個々の原子間の静電エネルギーは、クーロン力による部分 E_{Coul}

$$E_{Coul} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq j} \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

（ e は電気素量， ϵ_0 は真空の誘電率， q_i と q_j は原子 i と j の電荷， r_{ij} は原子間距離）

および、ファンデルワールス力による部分 E_{VDW}

$$E_{VDW} = \sum_{i \neq j} D_{o,ij} \left[\left(\frac{R_{o,ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{R_{o,ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right]$$

（ $D_{o,ij}$, $R_{o,ij}$ はレナード・ジョーンズパラメータ）

で表わされる。ファンデルワールス力に関する CLAYFF というモデルを少し修正したモデルを採用すると、Na-スメクタイトの吸水に関する GCMC シミュレーションは X 線回折と中性子線回折の実験結果をよく復元するという (Fig.9).

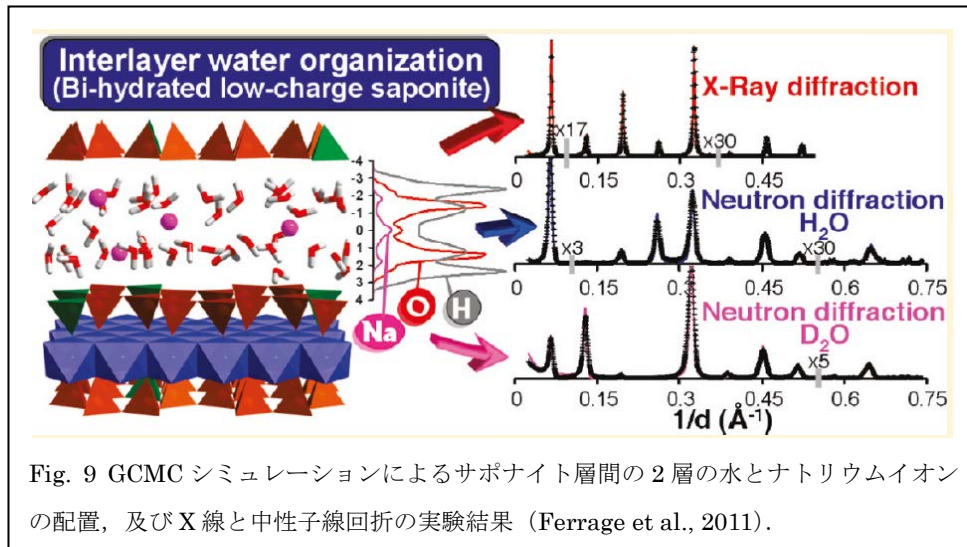


Fig. 9 GCMC シミュレーションによるサポナイト層間の 2 層の水とナトリウムイオンの配置，及び X 線と中性子線回折の実験結果 (Ferrage et al., 2011).

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.
- Delville, A. and Laszlo, P., 1990, The origin of the swelling of clays by water. *Langmuir*, **6**,

1289-1294.

Ferrage, E., Sakharov, B. A., Michot, L. J. , Delville, A., Bauer, A., Lanson, B., Grangeon, S., Frapper, G., Jimenez-Ruiz, M., and Cuello, G., 2011, Hydration properties and interlayer organization of water and ions in synthetic Na-smectite with tetrahedral layer charge. Part.2. Toward a precise coupling between molecular simulations and diffraction data. *J. Phys. Chem. C*, **115**, 1867-1881,

岩崎孝志, 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 — 特に Ca および Na の分布について. 鉱物学雑誌, **14**, 特別号, 78-89.

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.

日本化学会 編, 2002, 「第2版 コロイド化学の基礎—講義と測定マニュアル」. 丸善
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.

Otsuki, K., 1998, An empirical evolution law of fractal size frequency of fault population and its similarity law. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 671-674.

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.

Villar, M. V. and Lloret, A., 2008, Influence of dry density and water content on the swelling of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, **39**, 38-49.

Yong, R., 1999, Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance. *Engin. Geol.*, **54**, 83-91.

Zang, Z. Z. and Low, P. F., 1989, Relation between the heat of immersion and the initial water content of Li⁻, Na⁻, and K⁻montmorillonite. *J. Colloid and Interface Science*, **133**, 461-472.

補遺

有識者会合の任務は純粋に科学ベースで原発敷地内活断層の活動度評価を行うことであると理解している。学術雑誌等に投稿された論文は editorial board に回され, editor の主導の下に複数の reviewers は, ①成果に新奇性があること, ②データの量と質が十分であること, ③事実と解釈が明確に区別されていて, ④論理展開が健全であること等の基準に従

って peer review する。Review の結果に応じて accept, minor revision, major revision, reject などと判定され、査読の途中で withdraw になることもある。電気事業者から提出される報告書・資料は学術論文ではないので、①の成果の新奇性は問われない。その反面安全性に関わることなので、②以下の要件は十分に満たされなければならない。以上のような基準に基づき、東通原発に関してこれまで東北電力から提出された報告書・資料を peer review すれば、判定は withdraw である。

第 7 回会合に提出された報告書・資料に関して逐一コメントの下書きをしたことがあるが、それは 200 か所を下らなかつた。このような状態は毎回の会合に提出される報告書・資料でも基本的に変わらない。それら不十分な点は以下のように類型化できよう。

1. データはあっても正当な方法で解析されていない。そのために事実が見えない。キーとなるデータが無いままであることもある。
2. 根拠が薄弱で logic が粗雑な解釈が大変多い。それに気が付いていないのか、そのような解釈の屋上屋を重ねてしまっている。明らかに勉強不足・科学の基礎力不足を認めない。
3. 会合で指摘されたことが十分理解されていないためなのか、それらが次の会合のステップとならず、進展を妨げている。最近の報告書には「議論のポイント」一覧があるが、「説明済み」とされている項目の多くに関して、有識者側は納得できる回答を得たとは認識していないだろう。
4. Presentation が極めて悪い。図の数が多い割合には、説明が不十分であり、内容が整理されていない。

以下に主要な個々の事例に関して、簡単に述べる。

1. 「膨張」のメカニズム

当初、東北電力はカサ密度の減少をそのまま体積膨張に換算していた。風化によるアルカリ金属元素等の溶脱を考慮していな乱暴な推定だとこれを大槻が批判した。その後東北電力は、風化によってモンモリロナイトが生成され、その吸水膨潤が体積膨張の原因と唱えた。しかし、地下深部の岩盤劣化度 A（最も未風化）であっても相当量のモンモリロナイトが含まれることに加え、岩盤劣化度とモンモリロナイト含有量はほとんど相関しないという統計解析結果が大槻から示された。さらに岩盤劣化度 D と E ではむしろモンモリロナイト含有量が漸減する傾向があり、代わってハロイサイトが急激に増加するということが指摘された。ここに至って東北電力は、何の根拠も無いまま“ハロイサイトの結晶成長力”なるものが膨張力の原因だと主張するようになり、また、風化によって岩盤が膨張するがメカニズムは不明だと主張するようにもなった。

最さしたる根拠もなく、本質的なことの一つである力の源を二転三転するようでは、通

常の学術論文では **withdraw** である。

2. 体積歪を検出する方法

東北電力は、Ti を不動元素と仮定して体積歪を推算する方法(Brimhall & Dietrich, 1987) とそれを応用した論文 20 編ほどを紹介した。Ti, Zr, Y, N などは相対的に **mobility** が低いことは従来からよく知られていることであるが、上記の方法では Ti が全く不動との仮定 に立っているため、求められた体積歪の精度は Ti の **mobility** の絶対値にかかっている。ところが、上記の 20 編ほどの論文のいずれもが Ti の **mobility** の絶対値を求めてはいないので(鹿園ほか(2007)も同様)、推定された体積歪は信頼に足りない旨大指摘した。他方では、浅部での初期続成過程であっても碎屑性 Ti 鉱物が溶解・移動し、新たに Ti の自生鉱物が出来ている証拠を示した Pe-Piper et al. (2011)の論文も紹介した。そこには『ある条件下では、Ti が不動元素であるとか、堆積岩中のルチルなどのチタン鉱物が全て碎屑性起源だとする仮定は成り立たない』と述べられている。これに対し東北電力は、東通とは地学的環境が違うというばかりで、何がどの程度異なるから、東通では Ti はどう挙動するのだという具体的・定量的な検討結果を示せないまま、今日に至っている。

東北電力が上記 Ti 法によって推算した“体積歪”は同じ劣化度ランクであっても著しくばらついている。この原因が検討されたことはない。Ti を不動元素として体積歪を推算する際、“原岩”の密度と Ti の濃度のデータが必要である。そこで、近傍の“原岩”とおぼしき岩石を“原岩”として代用することになる。推算された“体積歪”の著しいばらつきは、代用した“原岩”に問題があるのかもしれない。当然その吟味も必要になるが、それが示されたことはない。

3. 岩盤劣化度の定義

岩盤劣化度は、褐色化度(鉄の酸化の程度)、針貫入硬度、割れ目密度によって A から E まで 5 段階に分けられていて、岩盤膨張の鍵となるパラメータとして使われている。ところが、劣化度は 3 つのパラメータのどのような関数となっていて、劣化度 A から E はこのパラメータ空間のどの領域を占めるのかが示されたことはない。科学ではこのようなことは当然なされていなければならない。

4. 物理化学データの解析

物理化学データに限らず、せっかく得られたデータをしかるべく解析していない東北電力の状況は目に余る。有識者会合から物理化学データを全て開示するよう求められ、試料採取深度、岩盤劣化度、X 線回折によるスメクタイト濃度、陽イオン交換容量、メチレンブルー吸着量に関する大量のデータが報告された。大抵がこれらの統計解析結果を示す前に、東北電力からこの種の解析結果が報告されたことはなかった。これは科学をする者にとって信じ難いことである。

大槻がモンモリロナイト含有量と岩盤劣化度とがほとんど相関しないことを指摘した後、東北電力は強劣化部でハロイサイトが多いことに初めて言及した。X線回折のチャート見てさえいけば、ずっと早期に気が付くはずなのだが、これも理解に苦しむことのひとつである。

X線回折による鉱物種同定結果とXRFによる元素濃度分析を組み合わせて行うノルム計算は、前進であった。きちんと解析すればそれなりの正しい結果がでてくるものなのである。

火山ガラスにTiが検出されなかったとか、東通のTi鉱物はPe-Piper (2011)による自生のTi鉱物とは違うとか、電顕での後方散乱像は通常は4000倍以上では見ないとか、科学ベースで何かを知ろうとしている者達から見れば、もっとしっかり観察・分析しなさいというばかりである。

5. 基盤上面の凹凸と岩盤劣化度との相関解析

体積膨張は風化が原因だと主張したいなら、岩盤劣化度と基盤上面の凹凸との定量的な相関関係を示すのが一つの方法であるが、そのようなデータ解析結果が示されたことはなかった。このこと自体、信じ難いことである。第11回会合ではじめてそれらしき解析結果が示されたが、幼稚な解析に留まっている。すなわち、何を基準にして計ったか明示されていない凹凸の量と、単に劣化部の厚さとの相関図なのである。基盤上面の凹凸はM1段丘堆積物の堆積直前の地形的凹凸とその後の変形による凹凸の和なのだから、両者を分離し、後者と岩盤劣化度とを比較しなければならない。問題は如何にしたら分離できるかである。凹凸には様々な波長のものが含まれているのだから、例えばフーリエ解析のようなスペクトル解析は不可欠であり、波長を考慮せずに劣化度と比較してはならない。東北電力は体積膨張が岩盤劣化度とともに増加すると主張していて、劣化度は深さ方向にも変化するのだから、凹凸と比較するのは単なる劣化部の厚さではなく、劣化度を深さ方向に積分したような量でなければならない。さらに、同じ劣化度であっても、膨張歪は上載荷重や含水率によって異なるのだから、これも考慮しなければならないだろう。

東北電力による岩盤劣化度と基盤上面の凹凸の相関に関する解析は、このように余りにも粗雑である。この粗雑さは全体に共通している。

6. 小断層解析と応力場

小断層集団に関しては、①それらがテクトニックな応力でできた断層なのか、それとも体積膨張による応力で出来た非テクトニックなものなのか、②小断層は地震を起こすか、起こさないか、という2つの点から議論されてきた。①に関しては、東北電力は小断層の方向がランダムであるとして、体積膨張による応力で出来たとした。しかし、大槻のコメント(その8)の4で指摘されているように、トレンチの方向に卓越性があることによるバイアスを補正しても、NNE-SSW方向の断層が卓越していることは明らかである。

東北電力は、応力多重逆解析法が4組の主応力軸を推定したことをもって、小断層集団の方向がランダムで、したがって体積膨張で出来たと再度主張した。しかし、大槻のコメント（その8）の4で述べているように、東北電力が示した図において、オレンジ色の○、☆、および△で表示されている主圧力軸の方向は近接していて、これらを一括して1つのグループとみなすこともでき、赤い□で表示された主圧力軸に対応する小断層集団をもう一つのグループとみなすことができる。そのように2つのグループに大別しなくとも、4つのグループが識別されたということは、ランダムではないと判定されたのである。

さて、ここで改めて指摘しておきたいのは、走向、傾斜、断層条線などの方向に多様性があったとき、それらをどうグルーピングするのが妥当かという問題に関してである。上記の○、☆、△はそれぞれ少しずつ異なるのだから、異なったグループであるという主張と（東北電力）、いや少しずつ異なるけれども似ているのだから、まとめて1つのグループであるとの主張（大槻）のどちらが正しいか。視点を少し変えて、 $y = f(x)$ に関する (x, y) の n 組のデータがあった時、 n 組の (x, y) を全て通る $n-1$ 次の多項式が必ず存在するからといって、この多項式を回帰曲線として機械的に採用するようなことは通常やらない。では、どのような回帰式が妥当なのか。このような問題を解くには、赤池の情報量基準（AIC）が用いられることを述べておこう。東北電力は、もちろんこのような検討をしていない。

②の問題に関しては大槻のコメント（その7）に詳述してあるので、それを参照して欲しい。この問題に関して東北電力が誤った主張を繰り返しているのは、単に基礎知識が乏しいことに因る。

データはあるのに解析しなければ、データの意味するところは見えてこない。その例は、断層の規模別頻度分布に関しても認められる。このことは大槻のコメント（その8）の5で指摘したので、ここでは繰り返さない。しかし、もし、断層集団のサイズ分布がフラクタル的であることに関する基礎知識があるなら、累積頻度分布がべき分布になっているか、べき数はどんな値かなどを検討する他、敷地全体での最大サイズや断層密度などを予想しようとするであろう。東北電力の報告書にはそのようなことが見られない。

上に述べた事例の他にも、東北電力の報告書にはしかるべきデータ解析法、解釈をする際の基礎知識、論理展開の無矛盾性などに不十分な点が多数あるが、今はここまでとしておく。