

第二部 全くデタラメな岩盤の“劣化膨張説”

東北電力は“第四紀変状”が活断層やそれと関係した現象であることを否定したためか、事あるごとに岩盤の劣化膨張が原因だと主張する。この説は原子力規制委員会有識者会合の発足以前から主張されていたが、さほど吟味もされないままに放置されていた。言うまでもなく、“岩盤劣化膨張説”は“変状”の原因に関わることで、最も重要なテーマである。ところが、有識者会合もこのことに対する評価が不十分なまま終わりを迎えてしまった。以下に述べるように、東北電力自身のデータがこの説を完全に否定しているし、理論的根拠も誤りだらけで、全く架空の作り話である。このことを理解すれば、その他の問題を正しく理解する道が開け、最初に“劣化膨張説”を解剖する。以下に、この説に関わる個々の問題について順を追って解説する。なお、引用文献まで知りたい方は、該当する「大槻からのコメント（その〇〇）」を参照されたい。

1. 岩盤劣化度

東北電力によれば、第四系直下の岩盤（泊層と蒲野沢層）は、表層の10mほどが風化し、劣化している。彼らは“岩盤劣化度”を未風化のAから最高劣化度のEまで5段階に区分した。劣化度判定のパラメータは褐色度、割目密度、および針貫入強度の3つとされている。褐色度は Fe^{2+} が Fe^{3+} に変わるという鉄の酸化の度合いを表わす。寒/暖、乾燥/湿潤、凍結/融解などの繰り返しで岩盤の表面には大小のクラックが発生する。割目密度はこのような物理風化の指標のひとつである。岩盤に天水が浸透し続けると、岩石を構成する鉱物は少しずつ溶解し、ある種の元素は運び去られてしまうので、硬い岩石も骨粗鬆症のように次第に多孔質化し、弱くなる。そのような過程を化学風化と呼ぶが、針貫入強度は粗鬆化の指標である。

劣化度A~Eは上記の3つのパラメータで定義されたと言うが、**各劣化度は3つのパラメータ空間のどのような位置を占めるのか**。これらのパラメータは互いに独立ではなく、**ある相関を示すものと予想される**。“岩盤劣化度”は東北電力が様々な主張を展開する際のキーパラメータなので、このような事を前もって吟味しておくことは科学的常識なのだが、東北電力からの報告書の中にそのようなことが示されたことはない。驚くべきことである。

2. 岩石の密度減少は体積膨張に因る？！

化学風化とは酸加水分解（土壌中の有機物の酸化や大気中の CO_2 溶解に伴って生じる H^+ が原因）などによって鉱物中の Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ などの塩基カチオンが主に溶脱し、**多孔質化・低密度化する過程**である。アルカリ元素やアルカリ土類元素に比べて溶解しにくい Al^{3+} は残留しやすい。そのため、化学風化の程度は通常 Chemical Index of Alteration

$$\text{CIA}(\%)=100\times\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$$

などで評価される。

ところが、東北電力はこの**低密度化を岩石の膨張に因る**と考え、劣化度 A, B, C, D, E の平均密度 2.11, 2.08, 2.04, 1.98, 1.94 gcm^{-3} から劣化度毎の体積歪（膨張）を 0.00, 1.42, 3.32, 6.16, 8.06% であるとしてしまったのである（事前会合配布資料地震・津波 16-6）^(注1)^(注2)。東北電力はこの“膨張”で発生する圧縮応力で“第四系変状”を説明しようとした。これは**化学風化のイロハもわきまえない誤り**である^(注3)。

^(注1) 有識者会合が組織される前の耐震バックチェックの時から、密度減少をそのまま膨張歪に焼き直すことに疑問を呈する委員が居たが、深められなかったようだ。

^(注2) 第7回評価会合東通・現調 10-2-2-2 では、劣化度 A, B, C, D, E の密度が 2.36, 2.11, 2.11, 1.56, 1.56 gcm^{-3} 、体積膨張が 0, 0, 10, 20, 20% と大幅に変えられているが、その根拠が不明のままである。

^(注3) この項に関しては大槻のコメント(その1)と(その2)を参照されたい。

3. モンモリロナイトの吸水膨潤による体積膨張説

体積膨張を密度減少から推定するという余りにも幼稚な誤りを指摘された東北電力は、新たに珍妙な説を唱えだした。すなわち、岩盤が劣化すると、水を吸って膨張するという性質を示すモンモリロナイトができる。劣化とともにこの粘土鉱物の含有率が増加して岩盤が膨張し、それによって“第四系変状”が形成されたというのである。大槻からのコメント(その2)では、モンモリロナイト膨張説の正しさを主張したいなら、モンモリロナイト含有率分布図を示すことが最低限必要である旨を指摘した。これに応じてか、データが徐々に増え、第9回評価会合の配布資料 東通・現調 10-2-2-2 と 2-2-3 には、トレンチからの試料とボーリングコア試料に関する大量の X 線回折によるモンモリロナイト含有率^(注1)、陽イオン交換容量(CEC)^(注2)、およびメチレンブルー (MB) 吸着量^(注3) のデータが公表された。大槻からのコメント(その6)には、それらの全面的なデータ解析結果が示されている。そこでは、モンモリロナイト (スメクタイト^(注4)) の定量性に最も優れている **X 線回折分析結果と岩盤劣化度との間には、トレンチからの試料に関してもボーリングコア試料でも、有意な相関は全く認められないことが明らかにされた (Fig. 1)**。「“第四系変状”の原因がモンモリロナイトの膨潤である」とする東北電力の主張は、自らのデータによって完全に否定され、何の根拠も無く主張していた非科学性が明らかになったのである。

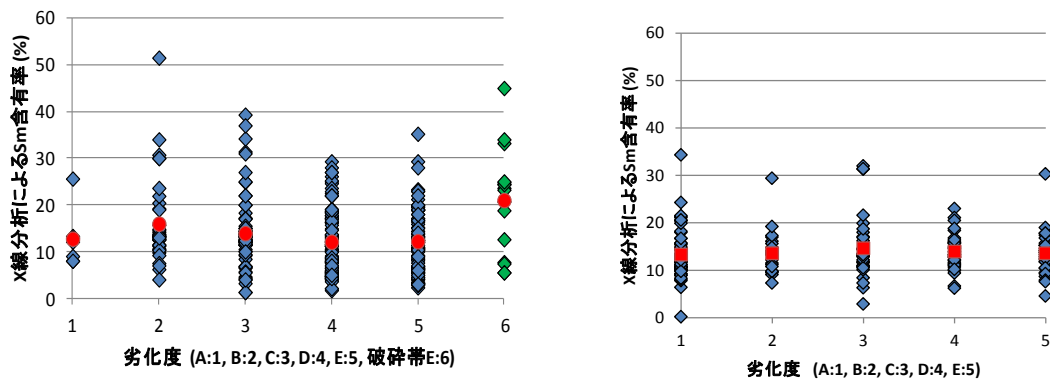


Fig. 1 岩盤劣化度とモンモリロナイト（スメクタイト）含有率との関係．赤印は平均値．

左図はトレンチからの試料で右図はボーリングコア試料に関する分析結果．

（注 1）X 線回折によって鉱物を定量するには、検量線を用いる方法が一般的である。東北電力がこの方法を採用しているかどうかは不明。X 線回折のチャート上でのピークの面積は、相対的な定量値を表す。

（注 2）陽イオン交換容量 CEC に関して：結晶表面や欠陥には不対電子で占められた結合手（dangling bond）があり、ケイ酸塩鉱物の表面は一般に負に帯電しているため、陽イオンを引き寄せる。結晶のエッジは陽イオンを引き寄せる能力の高いサイトであり、ハロイサイトの CEC は主にこの機序による。モンモリロナイトの場合は結晶格子内の同形置換（例えば Si^{4+} が Al^{3+} に）が起こるのが普通なので、正電荷の不足が生じ、4 面体シートの間に陽イオンを引き付けている。これらの陽イオンをより侵入し易い陽イオン（例えば NH_4^+ ）と交換することによって、置換可能な dangling bond を定量するのが陽イオン交換容量法である。ハロイサイトとモンモリロナイトの CEC はそれぞれ 10~40、および 80~150 meq/100g（試料 100g 当たりのミリ当量）である。東北電力の資料中の CEC は、実はモンモリロナイトとハロイサイトの CEC の合計であることに注意。

（注 3）メチレンブルー吸着量 MB に関して：メチレンブルー（ $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$ ）は水中では陽イオンとなる。この吸着機序も CEC の場合と同じで、陽イオンが大分子であることだけが異なる。利点は、吸着された陽イオンの量を色の変化で定量出来るという簡便さにある。東北電力の報告書ではモンモリロナイトが MB で定量されているかのごとく書かれているが、MB にはモンモリロナイトの他、例えばハロイサイトによる吸着量も含まれていることに注意。

（注 4）モンモリロナイトはスメクタイト族の中の一つの粘土鉱物種。とりあえず、ここでは同じものと思ってよい。

4. ハロイサイトの結晶成長力による体積膨張説

まともな分析データが出てくるようになり、少しずつ真実が見えてきた。そのひとつが第 9 回評価会合の提出資料東通・現調 10-2-1-4 に掲載されているので、下の Fig. 2 に転載する。図に“(ノルム計算 (による))”と但し書きが付いているが、これに関しては（注 1）を参照して欲しい。とりあえず定量性に優れていると思ってもらえば良い。

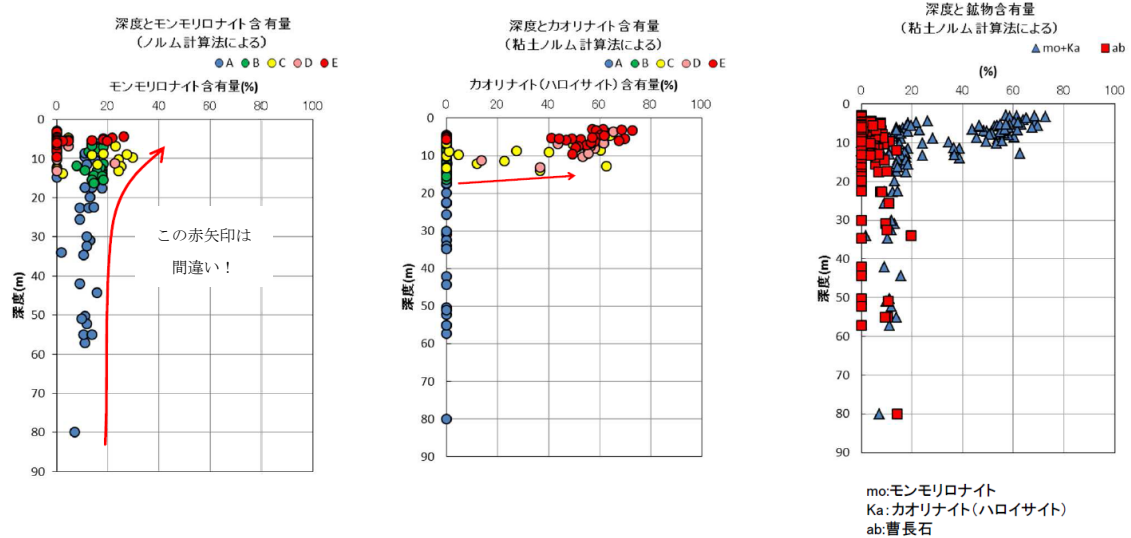


Fig. 2 ノルム計算で求めたモンモリロナイト含有率 (左), カオリナイト (ハロイサイト) 含有率 (中央), および曹長石の含有率 (右) の深さ方向の変化. 左と中央の図のマークの色は岩盤劣化度を, 右の図では鉱物種を表わす.

左の図から, モンモリロナイトはずっと深い所 (劣化度は A) にも 10% 前後含まれている. 深さ 15m 付近から劣化度が B 以上になり, モンモリロナイト含有率のバラつきが大きくなる. 劣化度 B から C へモンモリロナイト含有率が増加し, C から E に向って減少するように見えるが, 単なるバラつきかもしれない. 図には劣化度の増加とともにモンモリロナイト含有率があたかも増加するかのような赤い矢印が描かれているが, これは東北電力の“願望”である. 実際は上に述べたような変化であって, このデータも劣化度とともにモンモリロナイトが増加するという東北電力の主張を否定している. 他方, 中央の図によれば, 劣化度 C から出現したハロイサイト (カオリナイト^(注2)) が D, E へと爆発的に増加し, 含有率は最高で 70% にも達している. 右の図は劣化度とともに曹長石^(注3) が減少する状況を示している.

もう一つの興味深いデータは, F-9 断層の東側の高まりで掘削されたボーリング H25B-m2 からのコア試料を X 線回折分析した結果である (Fig. 3; 第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1 から転載). 深さ 52m から 12.4m まで (劣化度 A~B) はスメクタイト (モンモリロナイト) のピークが明瞭で, ハロイサイトは認められない. これとは対照的に, 11.27m 以浅 (劣化度 C~E) ではスメクタイトのピークが次第に低くなり, 変わってハロイサイトのピークが顕著になる. そして, 深さ 5.2m (劣化度 E) ではスメクタイトは全く消失し, ハロイサイトのピークの高さは最高になる. このデータは Fig. 2 のデータより強烈で, 岩盤劣化度が増す地下浅所ほどスメクタイトが少なくなり, ついには消失してしまうのだから, 東北電力のモンモリロナイト膨張説が成り立つ余地は全く残されていない.

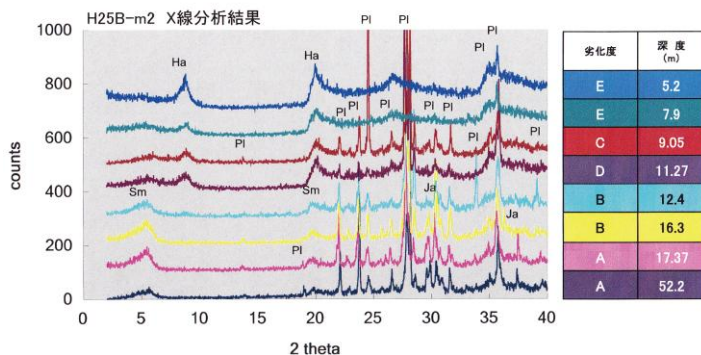


Fig. 3 ボーリング H25B-m2 からのコア試料の深度別・岩盤劣化度別の X 線回折分析結果.

ここで、場当たりの急遽唱えられたのが“ハロイサイトの結晶成長力による膨張”説である。その根拠は隣接する固体粒子間の隙間をブリッジするように成長したハロイサイト集合体の SEM 像だけである。他にフリーなスペース（孔隙）が沢山あるというのに、隣接する粒子押しをけるという余分なエネルギーを使ってまで結晶が成長するようなことは、通常あり得ない。

この“ハロイサイトの結晶成長力による膨張”説は、第 9 回評価会合以降は次第に主張されなくなり、「なぜ岩石が風化する際に体積が膨張したのかを完全に明らかにすることは、現在の学術レベルでは難しい」とつぶやくだけになった（第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-2）のが現状である。

（注 1）ノルム計算について：岩石の元素組成を理想的鉱物の量比で表現する古くから用いられてきた便宜的方法。この報告書で用いられているノルム計算は、X 線回折によって含有鉱物種を既知とする点で通常のノルム計算と異なる。XRF（蛍光 X 線分析）で求められた元素組成をある順序で既知の含有鉱物種に割り当てていき、鉱物組成を計算する。東通の岩石試料の主要構成鉱物は斜長石、モンモリロナイト、ハロイサイトなど種類が限られているので、鉱物組成を精度よく計算できていると思える。

（注 2）カオリナイトとハロイサイト：化学式はカオリナイトが $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ で、ハロイサイトが $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$ 。両方とも Al と Si だけの粘土鉱物で、水分子が付いているかいないかが違う。上のノルム計算では水は扱えず、2つを区別できないため、両者をカオリナイトで代表させている。

（注 3）ここでやっているノルム計算では、斜長石類を“曹長石”で代表させている。

5. 風化の溶脱帯と集積帯：ハロイサイトとモンモリロナイトの成因

小断層 s-19 近傍のボーリング BQ-1 の 13m 以深は地下水位面より下で、劣化度 A（未風化）である。したがって、ここには風化作用が及んでいないことになるが、それでも相当量モンモリロナイトが含まれていた（風化部の最高値の 70%程度）。このことは、13m 以深のモンモリロナイトは続成作用ですでに生成されていて、そこが地表近傍になったときに化学風化を重複して被ったことを示す。したがって“第四系変状”の原因がモンモリロナイトの吸水膨潤ではあり得ない旨を、大槻からのコメント（その 3）と（その 4）で既に指

摘しておいた。上に紹介したように、その後これが確証された（例えば、Fig. 2, 3を参照）。

水谷・歌田（1991，勘米良ほか編，地球科学選書『地球表層の物質と環境』第一章堆積岩の生成過程）によれば，冷温帯湿潤気候条件での風化は「カオリナイトーモンモリロナイト型風化殻」を形成するという。風化殻は表層部の溶脱帯とその下の集積帯から成る。溶脱帯に流入してくる天水起源の地下水は，炭酸ガスと有機酸が溶け込んで弱酸性である。そのため，斜長石やモンモリロナイトが溶解してCa, Na, Mg, Kなどが溶脱し，相対的にAlなどが富むようになり，ハロイサイト（やカオリナイト）が生成する。Fig. 2とFig. 3が示すモンモリロナイト $(\text{Na,Ca}_{0.5})_{0.2-0.6}(\text{Al}_{2-y}\text{Mg}_y)\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ → ハロイサイト $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ の現象は，まさにこの過程である。ケイ酸塩を溶かした水はアルカリ性になるので，溶脱帯で酸性であった地下水は，その下位の集積帯に至って弱アルカリ性になる。そこではモンモリロナイトとオパールが生成し易い。岩盤劣化部直下の未風化岩（劣化度A）に相当量含まれるモンモリロナイトの一部はこのようにして出来たものと思われる。上に述べた強劣化部でのモンモリロナイトの減少+ハロイサイトの増加という現象は，良く知られたありふれたことであって，劣化度とともにモンモリロナイトが増加するなど短絡してはならない。

6. 岩盤劣化の過程に関する東北電力の理解不足

東北電力の報告書を読んでいて，あまりの珍妙さにふざけているのかと思ったほどだが，どうも基礎知識の不足が原因のようだ。その一例が下のFig. 4である。

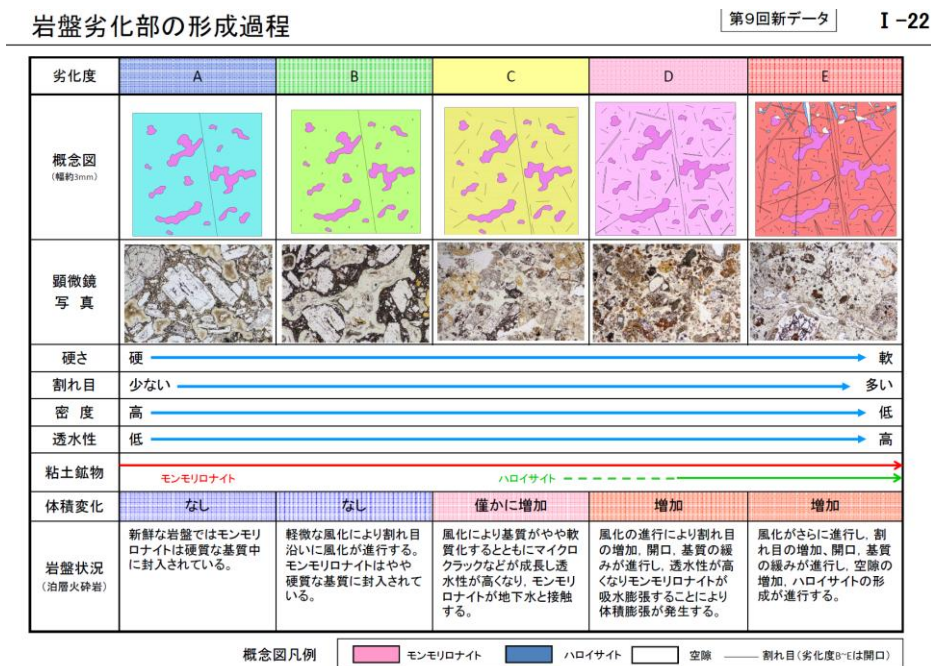


Fig. 4 東北電力による岩盤劣化部の形成過程の概念図。第9回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-1-4.

最下段の説明書きに注意して欲しい。A と B 欄には「モンモリロナイトは硬質な基質中に封入されている」と書いてある。C 欄には「マイクロクラックが発生してモンモリロナイトが地下水と接触するようになる」とある。そして、D 欄では風化で「基質の緩みが進行し、透水性が高くなり、モンモリロナイトが吸水膨張」するということである。そして E 欄には「風化がさらに進行し、・・・空隙が増加。ハロイサイトの形成が進行する」となっている。

そもそも、モンモリロナイトが形成されるには水が必要で、形成された時から“基質”（何のことやら）などに“封入”されてはいない。同様に、マイクロクラックが発生して地下水と接触するようになるのではなく、最初から接触しているのである。すでに水に接触しているので更に膨張することはない。膨張し得るのは上載圧が減少したときである。そして最後に、空隙が増加するからハロイサイトが生成されるわけではない。このように、地学の基礎を全く欠いていて、お話にもならない。

繰り返すが、モンモリロナイトの層間水の枚数は、所与の水蒸気圧および上載荷重と平衡しているので、膨張・収縮するのはこのいずれかが変化したときだけなのである。

7. 不動元素（チタン）法で体積歪は計れない

上に述べたように、まずは密度減少を体積膨張率に換算し、次のモンモリロナイトの膨潤説を経て、ハロイサイトの結晶成長力説に至る道程は、東北電力が次々と架空の話を創作し、それらが自らのデータによってその都度棄却される過程であった。これを逆から眺めれば、十分なデータを採取し、それなりのデータ解析を行い、基礎知識に基づいて多少考察すれば、それなりに真実に近づけるということを教えてくれている。モンモリロナイト膨潤説が否定された後、東北電力は“不動元素（チタン）法”という体積歪を求める方法を探し出し、東通に応用した。一応前進であるが、またしても勉強不足のため、前途を見誤った。この方法の解説と吟味に関しては、大概からのコメント（その5）に詳しく述べている。ここではその要約を述べる。

不動元素法は Brimhall and Dietrich (1987, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 567)が初めて定式化した。その後これといった進歩は無いようだ。この方法の原理は mass balance 基づく至って簡単なものである。密度が ρ_p 、その中の任意の元素 j の濃度が $C_{j,p}$ (g/g) である protolith (原岩) が風化し、密度が ρ_w (g/cm³)、元素濃度が $C_{j,w}$ に変化したとする。密度と元素濃度の変化を支配するのは、風化過程での元素 j の flux $\tau_{j,w}$ (g/g, 流入が正) と体積歪 ε_w (cm³/cm³, 膨張が正) のみである。この関係は、以下のように表わされる。

$$\frac{C_{j,w}}{C_{j,p}} = \frac{\rho_p}{\rho_w} \cdot \frac{1 + \tau_{j,w}}{1 + \varepsilon_w} \quad \text{-----(1)}$$

ρ_p と $C_{j,p}$ の値としては近傍の未風化の原岩らしきものそれらで代用し、 ρ_w と $C_{j,w}$ に関しては実測値を得ることができる。したがって、未知数は $\tau_{j,w}$ と ε_w の2つで、どちらか一方が何らかの方法で解れば、式(1)は解ける。例えば、元素 j が風化によって全く移動しない

なら ($\tau_{j,w} = 0$), 下の(2)式が成り立つ.

$$\varepsilon_w = \frac{\rho_p}{\rho_w} \cdot \frac{C_{j,p}}{C_{j,w}} - 1 \quad \text{----- (2)}$$

式(2)から求められる ε_w が不動元素法による“体積歪”である.

上の原理から分かるように, 濃度や密度の測定精度が完璧であれば, ε_w の精度は一重に $\tau_{j,w} = 0$ の仮定がどれほど厳密に成り立っているかによる. 言うまでも無く, これが厳密に成り立つ理想的な不動元素などは存在しないので, 古くから動きにくい元素として知られている Zr, Ti, Nb などを“不動元素”の代用として用いることになる.

第 8 回有識者会合の折に東北電力は不動元素法に関する 20 編ほどの論文を紹介し, この方法は科学の最先端にあり, 体積歪の解析法として確立している旨を述べた. しかしこれらの論文の論旨は, 原岩と風化岩の元素組成を調べ, その差が大きい順番が従来から知られている元素の易動度 (mobility) の順番 (例えば, $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Ti, Zr}$) と矛盾しないとか, 式(2)を機械的に適用して ε_w を求めただけとか, あるいは求めた ε_w を式(1)に代入して $\tau_{j,w}$ を求め, その大きさが一般に考えられている元素易動度の順番といかに調和的かによって不動元素法の妥当性を間接的にチェックしているに過ぎない. “不動元素”の易動度そのものを吟味した論文は皆無であるというのが実態なのである. しばしば目に付くのだが, 東北電力は論文を正確に読みこなせていないようだ.

元素の易動度は化学的環境によって変わるので, その大局的傾向を知るには大河川中の懸濁物中の元素濃度に対する水中のイオン濃度との比が目安になる. イオン濃度を mg/l, 懸濁物質内の元素濃度を mg/g で表わしたとき, 下の Fig. 5 では, Na^+ は 10^{-6} , Si^{4+} は 10^{-8} のオーダーで, Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} は 10^{-9} 前後である. Ti といえども確かに動いているのである (注1).

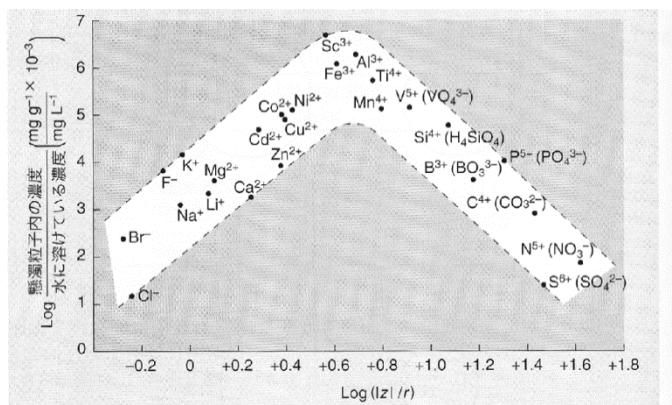


図 5.2: 河川中でイオンの存在する形 (懸濁粒子の成分か, 水に溶けているか) が, 比 $|z|/r$ (z はイオンの価数, r はイオン半径) の値に対してきれいに変わるようです. 酸素原子を含む陰イオン (オキシアニオン) については, 代表的な溶解イオン種を () 内に付記した. 濃度データは Martin と Whitfield (1983), ほかのデータは Krauskopf と Bird (1995) による.

Fig. 5 「地球環境化学入門」(J.E. アンドリューズ他著, 渡辺 正訳, 2007, シュプリンガー) から転載.

溶解度は孔隙水中の酸素、プロトン、有機酸などの濃度によって元素毎に変化するし、移動のし易さは間隙水の移動速度などにも依存するだろうから、選ばれる“不動元素”は研究対象(論文)毎に多少異なっている(例えば、ZrよりTiが良いだとか、その逆だとか)。このこと自体、TiやZrが完全には“不動”でないことの証なのである。

最近、Pe-Piper et al. (2011, *J. Sed. Tes.*, **81**, 762) はカナダ沖 Scotia basin 白亜系の prodeltaic な砂岩の中に、孔隙を埋めたり、押しつぶされていない状態の植物化石片を置換したりして自生しているチタン鉱物を発見した (Fig. 6, 7)。彼らによれば、地表直下の初期続成環境下で碎屑性のチタン鉱物が溶解し、その溶液から晶出したという。このことから、彼らはある条件下では、**Tiが不動元素であるとの仮定は成り立たないと結論**している。

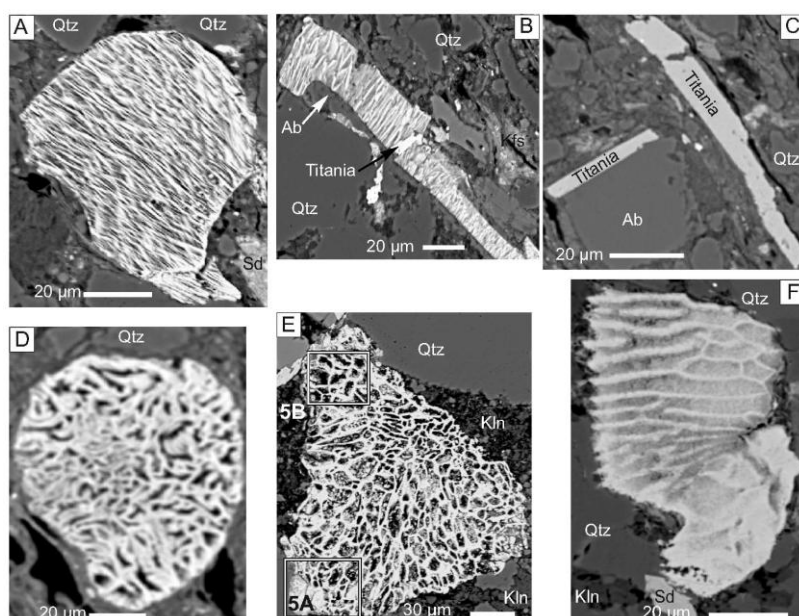


Fig. 6 植物性碎屑性粒子などの有機物を置換したチタン鉱物の後方散乱電子像。

A：おそらく針葉樹か銀杏の木質部の縦の断面で、大部分が仮道管。B：Aに類似した木質部。C：チタン鉱物の仮像。内部構造は見られないが、外形はBの図に似ている。D：介形虫のような原生物の有機質を置換したチタン鉱物。E：多分シダの柔組織か木質部のような乱雑な配置。F：同定困難な植物片を置換したチタン鉱物。Pe-Piper et al. (2011) から転載。

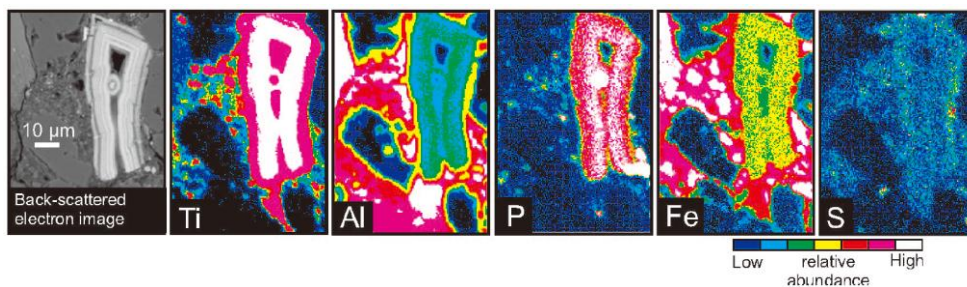


Fig. 7 堆積岩中の孔隙を充填して成長したチタン鉱物の EPMA 元素マッピング。

Pe-Piper et al. (2011) から転載。

不動元素法には技術的な問題もつきまといっている。この項の冒頭で述べたように、この方法では原岩とその風化岩の密度と不動元素の濃度が既知でなければならない。ところが、厳密に同じポイントからは原岩と風化岩の両方を採取するのは不可能なので、風化岩の最寄りのポイントから原岩を採取することになる。原岩が均質な花崗岩とか溶岩などなら、それでも問題なかろうが、堆積岩のような場合には**不動元素の分布が不均質なので、原岩を代表しない恐れが常につきまとう**。東北電力が紹介してくれた不動元素法の適用例に関する論文の中、6編は原岩を正しく代表出来ている状況であり、20~60%もの密度減少を伴っているが、いずれも体積変化は無かった。体積変化を検出した論文は4編で、2編は原岩を正しく代表していない恐れのある状況のもので、他の1編は後生的な地滑りで変形を被っているようである。残りの1編は「群発する崩壊」(千木良, 2002, 近未来社)で、花崗閃緑岩の玉ねぎ状風化を扱っている。この研究では原岩が正しく代表されていて、チタンを用いた不動元素法で50%もの体積膨張が推定されたという(Fig. 8)。しかし、本来は“玉ねぎ”の殻とその内側の“核”の境目で膨張が急増していると期待されるのだが、奇妙なことに、大きな膨張は“核”の中の“白色部”と“褐色部”の境界で起きている。さらに奇妙なのは、かさ密度が急減するのは、“玉ねぎ”の殻とその外側のマサ部との境界なのである。つまり、“白色部”と“褐色部”の境界から“玉ねぎ”の殻とその外側のマサ部との境界までの区間では、**50%も膨張しているにもかかわらず、かさ密度は4%程度しか減少していない**という結果なのである。このようなことはとても有りにくいことなので、不動元素法を不用意には使えない。

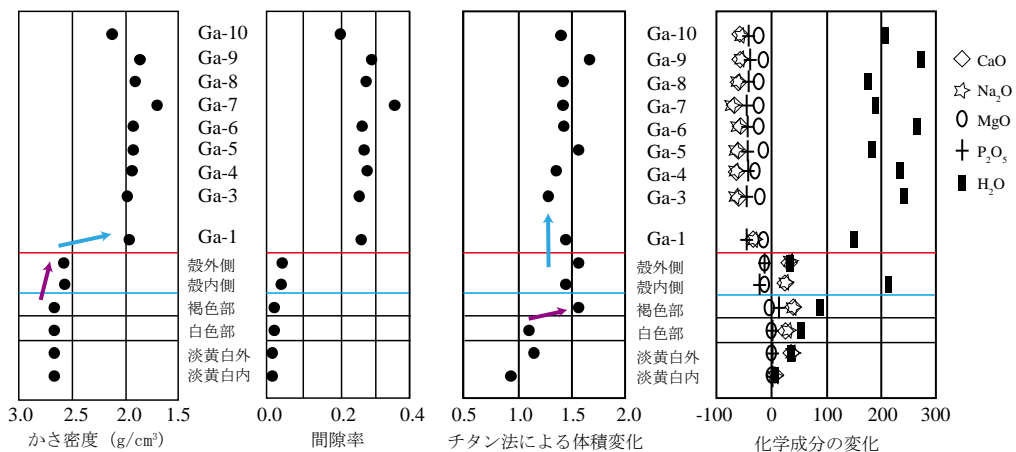


Fig. 8 柳生花崗閃緑岩の球状風化に関するかさ密度、間隙率、チタン法による体積変化、および化学成分の変化。千木良 (2002) を加筆して転載。

不動元素法の世界的情况は上のように頼りないのだが、東北電力は、この方法による膨張率として Fig. 9 のような結果を報告している。体積歪の平均値は劣化度とともに増加し

ているが、個々の劣化度内でのバラつきが大変大きい。劣化度 E では体積歪が 70%にも達する試料があることになっている。他方、どの劣化度においても 20%近くまで収縮している試料も稀ではないのである。普通に科学的センスが備わっていれば、劣化度の分類に問題はなにか、本当の原岩を分析しているのか、Ti の測定誤差はどうか、岩石中の Ti の局在性の問題をクリアーしているか、チタンは動いているのではないかと、というように疑い、吟味するものなのだが (注2) . . .

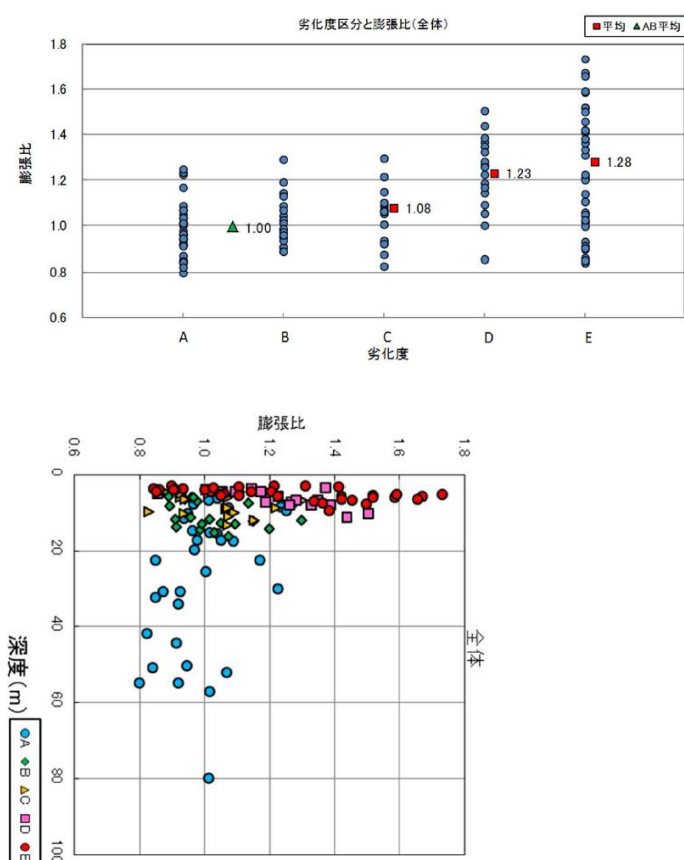


Fig. 9 岩盤劣化度と不動元素法で求めた体積歪との関係(上図), および体積歪の深さ方向での変化(下図). 第7回評価会合配布資料 東通・現調 8-1 から転載.

(注1) : Ti はルチル (TiO_2) やイルメナイト (FeTiO_3) として岩石の中に入っている。Ti そのものは酸化され易いのだが、Ti が不動元素とみなされるのはその酸化物が化学的に極めて安定だからである。一般に溶解速度は比表面積に比例するので、10nm の粒子の溶解速度は 100 μm の 10^4 倍である。したがって、火山ガラス中のチタン酸化物粒子の溶解速度は深成岩中それ何桁も速いだろう。角閃石中の Fe のごく一部は Ti に置き換わっているが、角閃石が溶解するときに Ti は (時間の長短は別にして) 一時的には T^{4+} になるだろう。火山ガラス中の Ti もそうだろう。それらが酸化されるまでの時間はどの程度なのだろうか。Fig. 5 に示されているように、河川水でも T^{4+} が検出されているのだから、結構長いのかもかもしれない。 T^{4+} が TiO_2 となっても、それらは単分子の suspension particle なので岩石の間隙中を移動できるから、

思いのほか mobile なかもしれない。

(注 2) 東通敷地内でのボーリングで回収されたセピオライトで固結した断層破碎帯岩には、近傍の母岩のそれより 1 桁ほど少ないものの 0.01wt% のレベルの TiO_2 が含まれていた (おそらく, XRF による分析値; 第 6 回評価会合配布資料 東通・現調 7-2)。このことは、熱水にわずかの Ti が含まれていて、Ti が不動ではない可能性を示唆する。なお、この指摘に対する東北電力の回答は第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1 に掲載されているが、答えになっていない。0.01% オーダーの Ti は EDS の検出限界以下だろうに、この回答では EDS でこのセピオライトを伴う断層岩を分析し、Ti は検出されなかったとしている。

8. 岩盤が膨張していない単純明白な証拠

上に“膨張”を様々な角度から吟味したのだが、実は岩盤が膨張していないことを示す単純明白な現象がある。第 7 回評価会合配布資料 東通・現調 8-1 から岩盤劣化度 A と E の SEM 像を Fig. 10 に転載する。未風化とされている劣化度 A であっても、斜長石は変質・溶解して骨粗鬆症のようになり、隙間にセル状のモンモリロナイトが出来ている。劣化度 E でも大変鬆症であり、隙間にハロイサイトが出来ている。モンモリロナイトであれハロイサイトであれ、それらが膨張あるいは成長して岩石全体の膨張に至るのは、隙間が埋め尽くされてからである。ところが、劣化度 E であってもスカスカのままなのである。

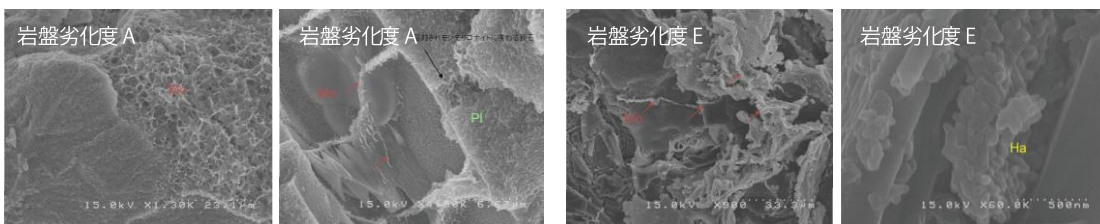


Fig. 10 岩盤劣化度 A と E の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真。第 7 回評価会合配布資料 東通・現調 8-1 から転載。

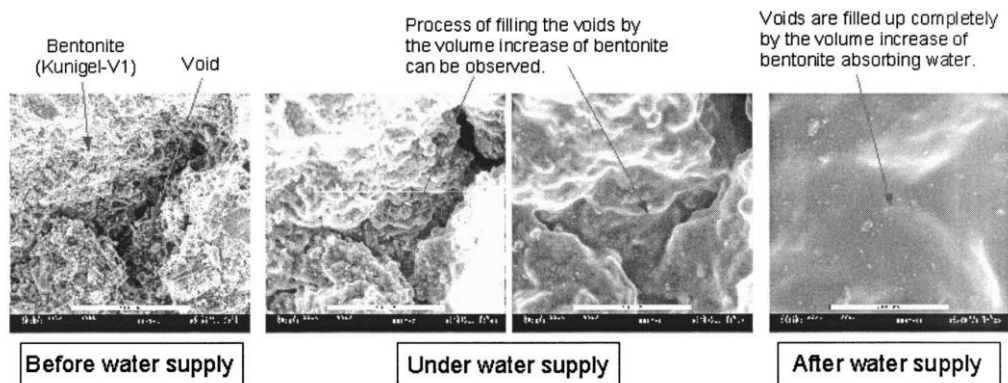


図 11 ベントナイトの吸水膨潤の進行に伴う微細組織の変化 (Komine and Ogata, 2004, *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 130, 818) .

他方, Komine and Ogata (2004, *J. Geotech. Geoenv. Engin.*, **130**, 818) は, モンモリロナイトの吸水膨潤実験を行い, 膨潤過程の SEM 画像を示した (Fig. 11). 吸水量が増加するにつれ, 写真の左から右へとベントナイト (モンモリロナイトのこと) が膨潤して隙間を埋め, ついには隙間がなくなってしまふ. これは当然の過程であり, 彼らが構築した膨潤の数値モデルでは, 試料全体の膨張は隙間が埋め尽くされてから開始するように設定されている.

Fig. 10 と Fig. 11 を見比べれば, 最も膨潤したはずの東通の劣化度 E の試料であってさえ, Fig. 11 の左端か 2 番目の写真に似ていることが分かる. すなわち, 今見る **東通の劣化岩盤は微塵も膨張の兆候を示していない**のである.

岩盤劣化膨張説が完全に架空のお話であることが明らかになったが, ついでに東北電力が唱えてきた風化・岩盤劣化にまつわるその他の幾つかの論点も吟味しておく.

9. 風化 (岩盤劣化) はいつ起こったか

東北電力は, 徳山 (1986, 北村 信教授記念地質学論文集, 571) の実験結果に基づいて“膨張”のストーリーを作った.

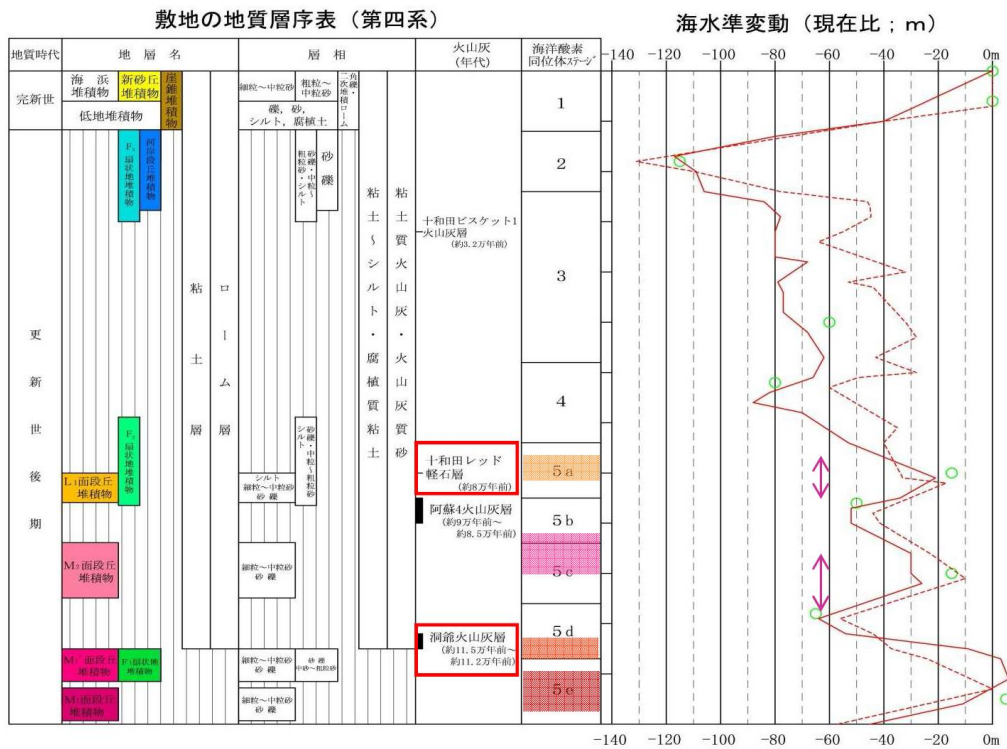


Fig. 12 東通の第四系層序, 海洋酸素同位体ステージ, および海水準変動の比較. 紫色の両矢印は, 東北電力が推定している“第四系変状”の時期. 第6回評価会合配布資料 東通・現調 7-2 から転載.

すなわち、『海進に伴って中位の M_1 面段丘堆積物が堆積している間 (MIS-5e) は地下水位が高かった。海退 (MIS-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層間水を 2 層持ったモンモリロナイトは層間水 1 層のモンモリロナイトになった。その後の再度の海進 (MIS-5c) とともに地下水位も上昇し、地下水に浸された層間水 1 層のモンモリロナイトは 3 層以上の層間水を持つモンモリロナイトになり、著しく膨張した』というわけである。要するに MIS-5d の海水準低下期に風化・岩盤劣化が起こったと言うのである (Fig. 12 を参照)。ここで改めて注意を促したいのは、東北電力が『“第四系変動” は岩盤が強く劣化している所ほど顕著な傾向があるので、“第四系変動” の原因は岩盤劣化による膨張だ』と言う時の岩盤劣化は、現在見ている劣化度であって、MIS-5d 当時のそれではないということである。

全く単純なことだが、第 9 回評価会合の配布資料 東通・現調 10-2-2-2 に掲載されているトレンチ壁面毎の劣化度マップから判断すると、既に風化してしまった岩盤が M_1 面段丘堆積物に不整合で覆われたと思ってもよさそうである。

この予想を裏付ける証拠は 2 つある。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, 応用地質, 40(1), 2) 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、 M_{1a} 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ようであって、**基盤岩と M_1 面段丘堆積物の風化度には明確に差がある** (Fig. 13)。



Fig. 13 トレンチ Tr-30 北面の写真。基盤岩の泊層の岩盤劣化が著しいが、 M_1 面段丘堆積物の礫の風化が格段と軽微あることに注目。

もうひとつの証拠は、劣化基盤岩とそれを覆う第四系中の粘土鉱物の差異である。すでに指摘したように、基盤岩中のモンモリロナイト含有率は劣化度とほとんど無関係か、むしろ劣化度とともに減少するのに対し、風化度の指標であるハロイサイトは劣化度 C から E に向って激増するのであった。そこで、第 9 回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-2-3 を参照する。モンモリロナイトは第四系からはほとんど検出されないが、ハロイサイトは普通に検出され、その検出率は M_1 面段丘堆積物から F_3 扇状地堆積物までは 30~40%である

(Fig. 14). とは言っても、**基盤岩の劣化度 C から E に向ってハロイサイト含有率が爆発的に増加したことに比べれば、第四系中のハロイサイトは画然と少ない。**

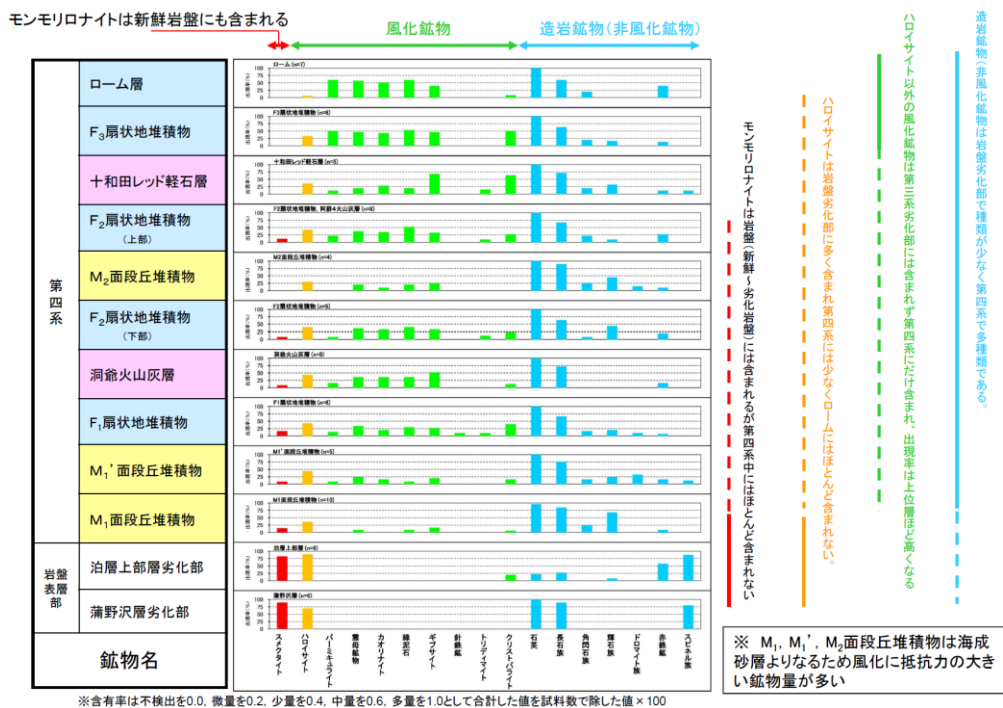


Fig. 14 第四系と基盤岩表層劣化部に含まれる鉱物の特徴. 第9回評価会合配布資料 東通現調 10-2-2-3 から転載. バーの高さは濃度ではなく、検出率であることに注意.

上の2種のデータは、**岩盤劣化の大部分が M1 面段丘堆積物の堆積以前に既に終了していた**ことを端的に物語っている. ところが、東北電力は M1 段丘堆積物後の MIS5d に岩盤が劣化し、MIS5c に膨張して“第四紀変状”が起こったと主張してきたのであるから、東北電力の時計が狂っている. ここでも彼らの主張が破綻していることは明白である.

10. モンモリロナイトの吸水膨潤のメカニズム

モンモリロナイトの吸水膨潤が“第四系変状”の原因であるという東北電力の主張は、もはや跡形も無く吹き飛んでしまったのだが、そうであっても膨潤のメカニズムを吟味しておくことは無駄ではあるまい. ここでも東北電力が頼りにするのは、徳山 (1986, 北村 信教授記念地質学論文集, 571) の論文 1 編だけである. 徳山はモンモリロナイトに関連して“相”という言葉を用いているが、モンモリロナイト底面の結晶格子間隔から判断すると、I 相, II 相, III 相, IV 相は、層間水がそれぞれ、2 枚, 1 枚, 3 枚かそれ以上、および 0 枚に対応するだけである. 以後は層間水の枚数を使用する. 徳山の主張は特異で、『層間水 2 枚のモンモリロナイトをそのまま水に漬けても膨張はわずかであるが、一旦乾燥させて層間水 1 枚にしてから水に漬けると体積が 2.3 倍にもなる』という. この経路依存性は非常識

とも思えるので以下に吟味する.

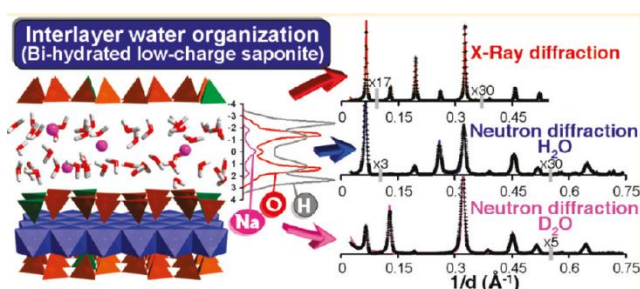


Fig. 15 GCMC シミュレーションによるサポナイト層間の 2 層の水とナトリウムイオンの配置, 及び X 線と中性子線回折の実験結果 (Ferrage et al., 2011, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 1867). サポナイトはスメクタイトの一種.

上の Fig. 15 は Ferrage et al. (2011) が分子動力学シミュレーションのモデルを解説するために用いたものである. モンモリロナイトは 1 枚の Al-O 八面体シート (図の青紫色; サポナイトは Mg-O 八面体シート) を 2 枚の Si-O 四面体シート (図の三角錐の並び) が挟む 2:1 層をなしている. 四面体シートは底面の O を外側に出している, これと水分子 (図の白-赤-白の小さなバー) が水素結合している. 八面体シート中の Al³⁺ が Mg²⁺ や Fe²⁺ などに, 四面体シート中の Si⁴⁺ が Al³⁺ などに**同形置換**し, シート全体では正の電荷が不足して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⁺, Ca²⁺ などの陽イオン (図の赤紫の球) 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中央に向けては陰イオンの濃度が高くなって**拡散二重層**が形成される. これは 2:1 層表面から広がる電場と重なり合うと斥力が生まれる. また, 四面体底面同士にはファンデルワールス引力が働く. 外的条件が一定なら両者は平衡しているが, モンモリロナイト結晶の外側に載荷応力が, 結晶端付近には水 (蒸気) 圧が作用し得る. 載荷応力が増加するか水蒸気圧が減少すれば収縮 (底面間隔が減少) して水分子が吐き出され, 載荷応力が減少するか水蒸気圧が増加すれば層間に水分子が入り込んで膨張する. 膨張が続けば, ついには単位層がばらばらになった分散状態に至る.

モンモリロナイト単結晶の吸水膨潤のメカニズムの骨子はそのようなものなので, **可逆的な過程**である. しかし, 温度を一定に保持し, 湿度 (水蒸気圧) の増加→減少とともに変化する水分子の吸着量 (adsorption isotherm) がヒステリシスループを描くという実験結果があるので (Cases et al., 1992, *Langmuir*, **8**, 2730), 実際は非可逆過程である. 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) 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固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強く凝集している。脱水過程ではこのファンデルワールス力だけの余分の力（水蒸気圧の増加過程のときよりも余分に小さい水蒸気圧）が必要なため、ヒステリシスループを描くことになる。確かに、バルクのモンモリロナイトも階層的な構造を持っていて、ミクロのレベルから順に結晶底面間のスペース → 単結晶のクラスター (tactoids) とその内部の micropore → それらが集合した REV (representative elementary volume) → REV の集合体とその間の macropore から成る clay peds, という具合である (Young, 1999, *Engin. Geol.*, **54**, 83)。底面間のスペースではなく、**メソ構造がモンモリロナイトの吸水膨潤が不可逆的な性格を帯びる原因**であるという結果は、徳山 (1986) の経路依存的な膨潤を考察する手掛かりを与える。

そこで注意を払うべきは、徳山の実験で“著しい膨張”が起きたのは、約 3cm 角の粘土試料を水漬した時であったことである（通常のこの種の実験では、精製した 1g にも満たないモンモリロナイトの粉を使う）。このやたら大きい粘土試料は、乾燥させて層間水 1 枚のモンモリロナイトにするときにひび割れが発生したという。ひび割れに直交する P 波速度は 2.3 km/s から 0.7 km/s に激減した例もあるという。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。そうであるなら、水は試料の奥深くまで速やかに浸透でき、ひび割れで孔隙の連結度が著しく増加し、水と接する有効比表面積も著しく増加する。そうすれば、水の吸着速度（したがって膨張速度）は格段に大きくなるであろう。他方、水に浸しても著しい膨潤を示さなかった層間水 2 枚のモンモリロナイト試料には、目に見えるようなひび割れが出来なかったという。要するに、ひび割れが生じた層間水 1 枚の試料は著しい膨張が速やかに起きたために、観察している間にそれを確認出来たが、ひび割れが生じなかった層間水 2 枚の試料は、水が試料の内部に浸透するのに長い時間を要するため、観察期間内に著しい膨張を確認出来なかったというだけのことであろう。

それにしても、モンモリロナイトの膨潤に関しては精緻な実験や理論的な研究が沢山あるのだから、東北電力は徳山 (1986) だけに頼ってはいけぬ。広くしっかりと関係論文をレビューするのが普通の科学研究の在り方である。

1 1. 東通はモンモリロナイトの層間水が 1 枚になるほど乾燥しなかった

乾燥によってモンモリロナイトの層間水を 1 枚に減少させるには、相対湿度が 50~60% 以下にしなければならない (Cases et al., 1992, *Langmuir*, **8**, 2730)。地下表層がこのような湿度であれば、植物は水を吸い上げられないので、地表は砂漠である。東通の地下数 m が過去 12 万年以降これほど乾燥したことはないだろうが、それを粘土鉱物からも検討しておく。

すでに述べたように、劣化度が C 以上の岩盤には大量のハロイサイトが生成している。ハロイサイトは 1 枚の Al-O 八面体シートと 1 枚の Si-O 四面体シートがペアになった単位

層を形成し、それが積層した 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、一旦無水になると容易には元にはもどれない（白水, 1998）。Fig. 16 に 20°Cでの加水ハロイサイト分率と相対湿度との関係を示す。例えば、相対湿度 60%では加水ハロイサイトに分率は 0.83 であるという。

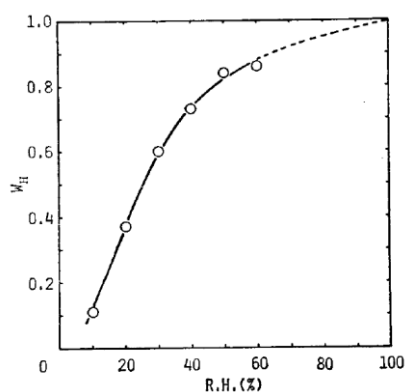


Fig. 16 20°Cでの 10Å のハロイサイトの存在確率 W_H と相対湿度 RH との関係。

(岡田・小坂, 1983, 窯業協会誌, 91, 329)

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 M_1 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。このように、ここでも「モンモリロナイトの顕著な膨張に必要とされた層間水 1 枚になるための乾燥」（これが誤りであることは上に指摘したが・・・）は否定された。

1 2. 岩盤劣化度分布と“第四系変状”の大きさ・頻度との対応

岩盤の劣化膨張が“第四紀変状”の原因であるとの東北電力の主張の根拠のうち、標記の関係は最も重要視されてきた状況証拠のひとつである。系統的・定量的なデータがなかなか示されなかったが、第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-2 に掲載された劣化部の厚さと最大鉛直変形量との相関図を Fig. 17 として転載する。8 か所のトレンチから得られたデータで、トレンチ毎に色分けして示されている。全体として非常に弱い正相関が認められる。

しかし、このデータには幾つかの問題がある。まず、断層に限っても全部で 232 本、小断層だけでも 85 本あるというのに、図中のデータ個数は 42 個に過ぎない。Fig. 9 に示されているように劣化度毎に体積歪が求められたと主張するのだから、横軸には歪を深さ方向に積分した値を用いるべきである。劣化度 A と B は体積歪が 0 とされていたので、単純に“劣化部の厚さ”ではなおさら不相当である。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。

変状には“撓み”も含まれるが、それは波長数 m から数 $100m$ まであり、スペクトル解析が欠かせないが、それがなされていない。そもそも鉛直変形量を測るには変形ゼロの基準線が必要だが、ここでもスペクトルの視点は必要不可欠である。基盤岩と被覆第四系との境界をマーカーとする場合には、浸食による凹凸と変形に因る凹凸とを分離しなければならないが、これもなされていない。これでは余りにも粗雑である (注1)。

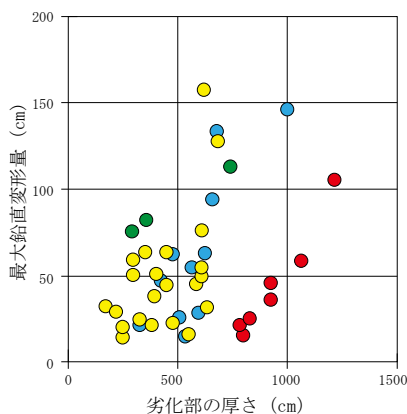


Fig. 17 岩盤劣化部の厚さと“第四系変状”の最大鉛直変形量との関係。

第 11 回評価会合配布資料 東通・現調 12-2-2 から転載。

以下に、劣化度がマッピングされているトレンチで、劣化度と“第四紀変状”の振幅の実態を第 7 回評価会合配布資料『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』，および添付資料 1~9 を基に概観する（これらの配布資料は原子力規制庁の現在の HP には掲載されていず、東北電力の HP にある）。

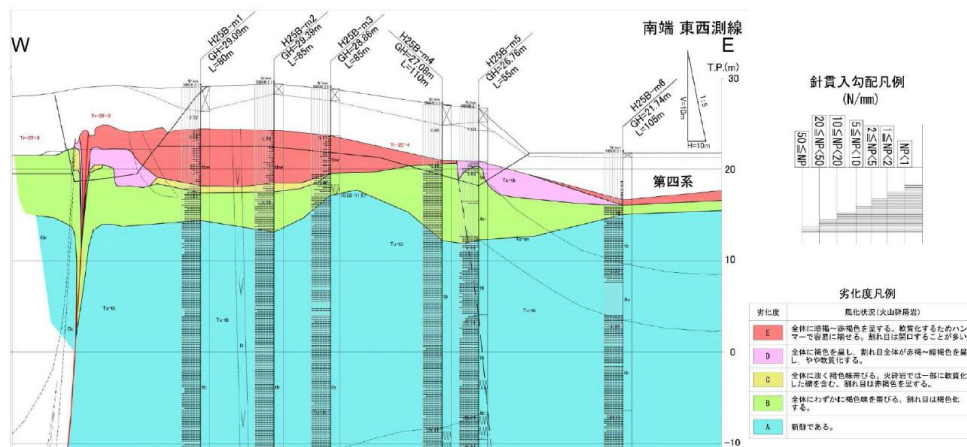


Fig. 18 トレンチ Tr-20'4 (F-9 断層より東側) 付近のボーリングコアの劣化度と針貫入試験の結果。

第 11 回評価会合配布資料 参考資料 5, p.6.

劣化度がマッピングされた最も長いトレンチは Tr-20'2~Tr-20'4 である (添 3 88-99, 添 3 39-50). 約 350m も長いので, 地形的凹凸と岩盤劣化度との相関は最も信頼性が高く (Fig. 18). 東北電力もこのデータを最も重視してきた. Fig. 18 によれば, 最大波長の変化はトレンチ東端から西端近くの F-9 断層まで単調に劣化度が上昇し, F-9 の西で急に低下する. これは大局的には基盤上面比高と調和的である. しかし, より短波長では両者に明瞭な相関が認められず, 凹凸はむしろ小逆断層によって規制されている. 例えば, Tr-20'4 北面の 2 つの小逆断層 (N33E48W と N16E66E) の間が落ち込んでいて, 後者の東にも東上がりの段差あるといった具合である (添 3 17).

その他のトレンチに関しては以下の通りである.

Tr-30 (添 4 45~53) は長さ 120m 弱だが, 劣化度と凹凸には何の相関もない.

Tr-31 (添 4 82~90) は長さ 130m 程度で, 波長 100m 程度のスケールでは劣化度と凹凸は相関する.

Tr-2k' (添 4 105~121) は長さ 60m 程度. 東が少し劣化 (C,D) して低く, 西は新鮮 (A) であるにもかかわらず高く, 無相関.

Tr-28 (添 4-152~160) は長さ 140m 程度で, 劣化度は大局的には東端から F-3 断層までがやや高く, F-3 の西側で低くなった後, 西に向かって増加する. 局所的に n54 付近の V 字型の 2 本の小逆断層の所は凹凸と正相関しているが, トレンチの反対側の面ではむしろ逆相関. 全体的には無相関.

Tr-34 (添 7 74~79) は長さ 33m 程度と短く, 相関を見るには不十分な長さのトレンチ. 2 つの小逆断層に挟まれた 20m 区間がわずかな高まりをなしていて, 劣化度との相関がある典型例のひとつとされている. しかし, 劣化度 D と E はこの 2 本の小断層の両側とほとんど変わらない上, 凸部は“ふたこぶ”になっていて 2 つの逆断層による隆起とそれらの間の凹部とも解釈できる (「第三部 10. 原子炉建屋付近も断層について」で詳述).

Tr-32 東西 (添 9 39~45) は長さ 92m 程度で, 波長 60m 程度で相関があると言えるかもしれないが, 有意とするにはトレンチが短すぎる.

Tr-32 南北 (添 9-62~64) は長さ 50m 程度で, 劣化度は全て E. 波長 15m 程度の凹凸は小逆断層による.

Tr-33 (添 9 80~82) は長さ 40m 程度で, 劣化度はほぼ一様に C. 凹凸は少ない.

Tr-29 (添 9 115~120) は長さ 80m 程度で, 劣化度と凹凸には相関は無く, 凹凸は小断層 s-14 などによる.

以上のように, **東北電力の主張に反し, 劣化度と基盤上面の凹凸とは, 明瞭な相関が認められない.** Fig. 17 は相関しているように見える所だけ拾ったのかもしれない.

(注 1) “第四系変動”の鉛直変位の測定に関しては, 第 9 回評価会合配布資料 参考資料 2-1~2-6 に掲載されているが, 変位を計測する際の基準線の設定を含め, 再検討すべきものも少なくない.

1 3. 「開口割目が膨張の証拠」は誤り

第 7 回評価会合配布資料の『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』の複数箇所には、多少意味不明瞭な部分があるのだが、「基盤岩中に亀裂が発達している」ことや「スレーキングは体積膨張を示唆する」という趣旨の記述がある (p.15 line17, p.46 lines5-6, p.46 lines12-14) . 劣化度凡例中の劣化度 E に関する説明では「割れ目は開口することが多い」と述べられている. 添付の「専門家からのご意見について」の中で、金折氏は「開口性割れ目の発達は大規模な体積膨張の証拠」とまで断言している (p.69 lines16-17, p.72 lines25-28) . 大槻からのコメント (その 4) はその誤りを指摘したが、東北電力は自らの誤りを理解していない. その後も、彼らは断層 F-3 に関わるトレンチ Tr-28 の水平掘削で観察された蒲野沢層中に発達する開口亀裂群の開口幅を測定し、体積膨張の証拠だとしたのである (第 9 回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-2 添 III-1-16).

言うまでもなく、開口性亀裂は引張応力で形成される. もし、基盤岩表層の劣化部のクラックの多くが開口性亀裂なら、そこには引張応力が作用していたはずである. **そのような引張応力が発生する状況は、劣化表層がその内側の未風化部分に対して収縮する場合であって、その逆ではない.**

1 4. 膨潤変形試験について

この件に関しては、大槻からのコメント (その 4) で吟味してある. 膨潤変形試験に関しては、第 2 回評価会合配布資料東通・現調 3-1 の p.70-71 にあるが、他の回の評価会合でも繰り返し同じ図表が配られている. データ+説明が併せて 2 ページだけで、よく理解できないこともある. そのような事項を含めて以下にコメントを述べる.

- 1) 膨潤試験に用いられた試料の中、Tr511, Tr512, Tr1631, および TR1632 は F-4 断層と F-5 断層の破碎部粘土である. したがって、断層破碎部に限らない岩盤劣化部での現象として主張された“モンモリロナイトの膨潤に伴う変状”の説明には使えない.
- 2) 上記の試験では、ある上載圧を載荷したまま自然湿潤状態に保っておいた試料に 0.06kgf/cm^2 (=5.9kPa: 上載地層の厚さ 0.35m に相当)と 0.20kgf/cm^2 (=19kPa: 上載地層の厚さ 1.14m に相当)を載荷し、蒸留水中で吸水膨張させたようだ. 膨張率は、上載圧が 0.06kgf/cm^2 の TR511 であってさえも 0.7%と極めて小さく、他の試験では 0.1%から-0.2% (収縮)であった. すなわち、“変状”を作るには程遠い. 上載圧を載荷したままで自然乾燥させれば収縮し、その試料を水浸させるのだから、もっと膨張するはずだが・ ・
- 3) 他にも 5 つの膨潤試験の結果が表示されている. 試料 Tr-27 は F-3 の破碎部粘土と弱破碎部泥岩、Tr-16 は F-5 の破碎部粘土と弱破碎部泥岩で、他の 1 試料 Tr-16 は風化砂岩である. したがって、これらに試験結果も断層破碎部に限らない現象として主張された“モンモリロナイトの膨潤に伴う変状”の説明には有効ではない.
- 4) 上記 3 で述べた試験での上載圧は 27.3 kPa と 47.3 kPa 程度で、TR511 などの試料で行った前の試験の 3~5 倍である. それにも拘わらず、最大膨潤率は数%から 23%に達するの

だから変である。さらに奇妙なことに、上載圧がともに 27.3kPa であるにもかかわらず、モンモリロナイト含有率がより高い破砕部粘土の Tr-27 の最大膨張率が 0%なのに対し、それがより低い弱破砕部泥岩の最大膨張率が 4.6%なのである。同様に、上載圧がともに 47.3kPa であるにもかかわらず、モンモリロナイト含有率がより高い破砕部粘土の Tr-16 の最大膨張率は 6.5%であるのに対し、それがより低い弱破砕部泥岩の最大膨張率が 23.2%なのである。しかも、モンモリロナイト含有率が最低 (12.9%) の Tr-16 風化砂岩の最大膨張率は、ほぼ同じ上載圧での Tr-16 破砕帯粘土部の 2 倍以上なのである。これではこれらのデータも“膨潤による第四系変状”には使えない。

- 5) 「試験結果」の説明では「最大膨張率は約 0~7%で・・・現在の上載圧と膨潤圧はほぼ釣り合った状態にあり、膨潤はほぼ終了している」と述べている (7%は 0.7%の誤り?)。試料採取深度は地下水位よりずっと浅く、東北電力のストーリーに従えば“II 相” (層間水 1 枚) が安定な状態に相当するだろう。膨潤試験は、そこから採取した試料を水に浸して行った、すなわち“II 相”にあった試料を“III 相” (層間水が 3 枚以上) の状態に置いたのだから、もっとずっと膨張すると期待されるのだが・・・ 同じ「試験結果」の説明の末尾に「乾燥状態」からの「最大膨潤率は 10~20%」とあり、その下の「評価」には「過去の膨潤に因る変形量は概ね 10~100cm 程度」となると述べられている。この「乾燥状態」とは何時のどの状態のことか? 5 つの case についてのモデル計算は、説明が無いので理解できない。
- 6) 2 ページ目の「膨潤圧の時間変化」試験では、数 MN/m² (数 MPa) の吸水膨潤圧が発生したようだ。だが、試験は試料を収縮限界 (含水比をこれ以上低下させても最早収縮しない状態) にして行ったのだから、大きな膨潤圧になるのは当然で、これをもって“変状”発生に十分の膨潤圧”などと言ってはならない。同じページの「上載圧と吸水膨張率」の実験結果においても、乾燥させた試料を用いているので、大きな膨張率になるのは当然。これではダメでしょう。

1.5. 有限要素法による“膨張”による“第四紀変状”の再現実験

事前会合配布資料地震・津波 16-6, 第 2 回目評価会合配布資料 東通・現調 3-1, および第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1 に小逆断層 s-19 周辺の有限要素法 (FEM) 解析結果が掲載されている。第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1, 第 9 回評価会合東通・現調 10-2-2-2, 第 11 回評価会合配布資料 参考試料 7 には小断層 f-1 付近の解析結果が掲載されている。バイリニア型弾性 2 次元モデル (平面歪) で、底面と左右の側面に適当な境界条件を仮定し、各要素に Ti 法で推定された劣化度毎の平均体積歪を入力し、応力と歪分布を出力している。

短時間変形なら弾性体近似が有効なこともあろうが、後述するように、劣化岩盤はかなり延性的なようなので、応力は緩和する。岩盤劣化は 1 万年オーダーの時間をかけてゆっくり進行するので、劣化で発生する“膨張力”も緩和してしまい、“第四系変動”を起こす

ことができないかもしれない。

Ti 法では正しい体積歪が求められないことは既に指摘したが、仮にそれが正しいとしても問題がある。Ti 法による体積歪は同じ劣化度であっても、大変大きなばらつきがあり、例えば劣化度 E では 70%の膨張から 20%の収縮までである。このような値を例えばランダムに劣化度 E の要素に割り振れば、歪勾配は局所的に大変大きくなり、様々な方向の小断層ができるだろう。ところが、後述するように東北電力のデータでは、明瞭な卓越方向を示しているのである。

滑らせた断層だけを前もって作ってあることも説得性を欠く。これでは希望する断層が現れるのは当然である。テクトニックな断層運動を再現するために左右の境界に強制変位を与えるが、それでは実際に合った変形が実現されなかったということになっている。これもどうにでもなる。滑らず断層面の摩擦抵抗を不均質性に適当に設定するのが一つの手である。この手の数値実験で実際に再現するにはかなりの自由度があるので、“膨張”が正しいということの有力な証明にはなりにくい。

このようなモデルの成否を確認することは、簡単な場合がある。例えば弾性近似が正しいなら、圧縮領域でトレンチを掘れば、トレンチは収縮するはずだし、トレンチが断層にかかっていたら、断層が動くはず。そのような実験をしたらどうだろうか。

16. 膨張の例：コロラドの heaving bedrock

東北電力は“第四系変状”に似たモンモリロナイトの吸水膨潤による変状の事例を示すことで、東通の変状が活構造ではないと主張しようとする。彼らを取り上げたのはコロラドの heaving bedrock で、第 6 回評価会合の東通・現調 7-2、第 7 回目の東通・現調 8-1 などに掲載されている。最も詳しい紹介は、第 8 回評価会合配布資料 東通・現調 9-2-1 と第 9 回評価会合配布資料 東通・現調 10-2-1-3、同 10-2-2-1&2 にある。

新しい造成地に線上の隆起が何本も顕れた。急傾斜で傾いた地層に大量のモンモリロナイトが含まれていて、降雨・散水すると膨張・隆起したという単純なメカニズムである。Heaving bedrock の幅を決めるのはモンモリロナイトを含んだ地層の厚さだし、間隔はそのような地層の間隔に対応するだけだし、隆起量を決めるのはモンモリロナイトの濃度と水が浸透した深さである。

東北電力はコロラドの heaving bedrock のサイズ、隆起量、形態などを東通の“第四系変状”と比較する。コロラドの heaving bedrock の原因は、東通の“第四系変状”の原因を考えるヒントなるかもしれないが、“第四系変状”の原因が劣化膨張であることの証拠にはならない。それは、いが栗を指さして「これはウニだ」と言うようなものだ。形の類似性はヒントにはなるが、それだけで証拠となるような現象はごく単純な現象だけである。