

2014年9月29日

東通原発敷地内活断層評価有識者会合委員各位

東北大学名誉教授 大槻憲四郎

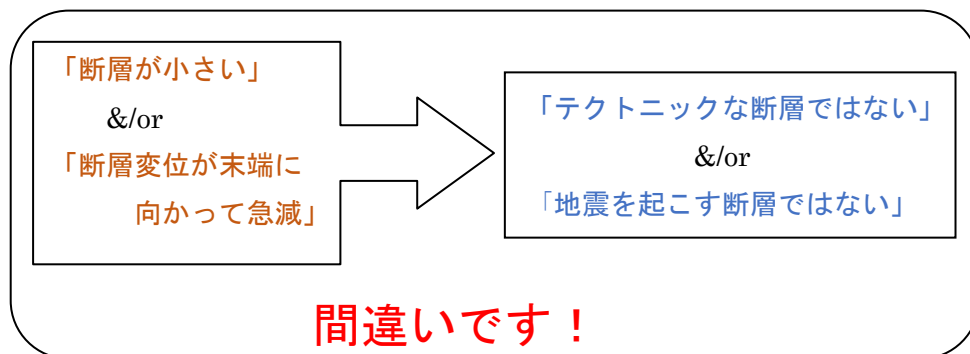
東通原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合

第10回評価会合に対して コメント (その7)

I. Tectonic/non-tectonic, seismic/aseismic 断層の

判定に関して

下のような判定基準を正しいと思い込んでいる地形・地質の専門家が少なからず居るようです。これは誤りです。そのことを以下に説明します。



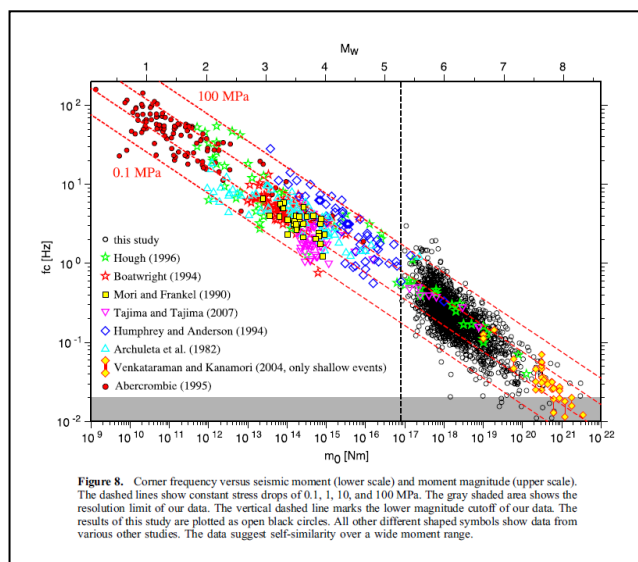
1. 観測・観察結果から

上記の判定基準が全くデタラメであることを、まずは観測・観察結果から示し、その後に理論面から少しコメントする。

昔、「smallest earthquake は存在するか？」ということが問題にされたが、今では M0~1 程度までの微小地震が世界各地で多数観測されている (M0 の地震の地震モーメント M_0 は $10^{9.1}$ Nm で、震源断層の長さは 10m 程度)。これらの微小地震も、例えば「 $M_0 \propto L^3$ (または、 $M_0 \propto f_c^{-3}$)」(注： $L \propto f_c^{-1}$) とか、「 $\Delta\sigma$ がサイズに依らずほぼ一定」などのスケーリング則をほぼ満足するので、より大きな通常の地震と本質的に変わるところがないというのがほぼ定説となっている (L は震源断層の長さ、 f_c はコーナー周波数、 $\Delta\sigma$ は静的応力降下を表わす)。参考までに最近 Allmann and Shearer (2009) がコンパイルした世界中の地震の

M_0 - f_c - $\Delta\sigma$ の関係を描いた図を図 1 として転載しておく。現在では、南アフリカ金鉱山では M-4 程度までの地震（断層の直径が 10cm 程度に相当）までも観測されていて、通常の地震の特徴と変わらないという。このように、断層が小さいということだけで aseismic とか non-tectonic であるなどと判断することは、観測事実と全く反するのである。

図 1.
世界各地の地震に関する地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c 、および静的応力降下 $\Delta\sigma$ との関係。Allmann & Shearer (2008) から転載。



次に「変位が断層端に向って急減する」断層の実態を知ることにする。この言明は、言い換えれば「断層長 L が小さい割合には平均変位量 D_m または最大変位量 D_{max} が大きい」断層ということである。地質学的断層の L と D_{max} のデータは多数あるが、Kim and Sanderson (2005) がコンパイルしたものを図 2 として転載しておく。

図 2 地質学的断層の長さ^aと最大変位量との関係。Kim and Sanderson (2005) から。

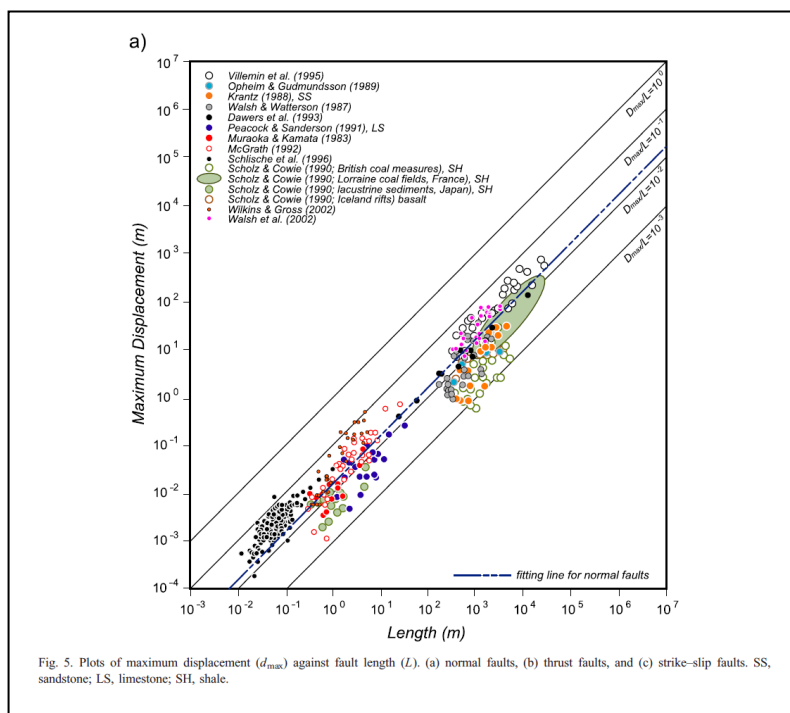


Fig. 5. Plots of maximum displacement (d_{max}) against fault length (L). (a) normal faults, (b) thrust faults, and (c) strike-slip faults. SS, sandstone; LS, limestone; SH, shale.

図 2 からは色々なことが読み取れるが、 $D_{max}/L = 10^{-3} \sim 10^{-1}$ 程度で、地震断層に関する D_{max}/L ($10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度) と比べて 1000 倍ほど大きいことに注意して欲しい。この図は $L = 100\text{m}$ で $D_{max} = 1\text{m}$ 程度の地質学的断層は実によりふれたものであることを示している、房総半島や日南海岸などの小断層もこの程度の D_{max}/L である。東通原発敷地内の小断層も同様であって、“粘土鉱物の体積膨張” などという特異な原因を持ち出すまでもないのである。なお、上記のようなデータ源や多少の議論に関しては、Kim and Sanderson (2005) を参照されたい。ショルツ (1993) の p.127 付近も参照のこと。

応力には“テクトニックな色”とか“地滑り色”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、tectonic/non-tectonic 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効果的である。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) は、仙台の長町一利府断層周辺の小断層を仙台市街地で 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。東通原発敷地の小断層に関わる応力場に関しては、コメント (その 4) で述べたので、それを参照されたい。

以上の観測・観察結果だけで、表題のような tectonic/non-tectonic, seismic/aseismic の判定条件が全く誤りであることが理解されよう。

2. D_{max}/L と破壊エネルギー

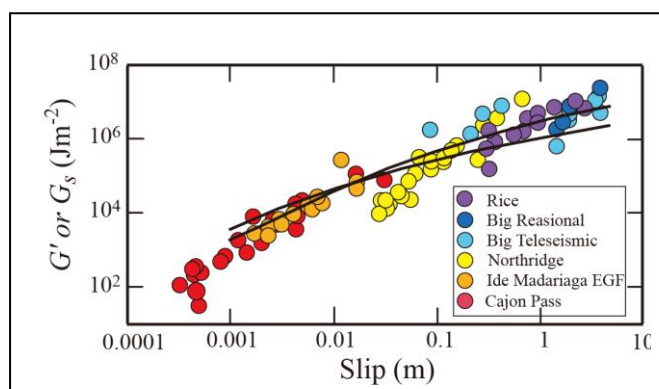
D_{max}/L は断層面近傍の平均歪を表わしていて、いわば破壊が起きる臨界歪である。岩石破壊実験の分野では、破壊直前までの永久歪が 3% 以下なら脆性、5% 以上なら延性など便宜的に分類したことがあった。破壊と摩擦は異なるし、実験と自然を比較するには、強度の寸法効果などを含むスケーリングも必要だ。しかし、大雑把には D_{max}/L はこの延性度に対応していて、 D_{max}/L が大きいということは断層の媒質がより延性的であると思ってよい。図 2 で取り扱われている断層集団のほとんどは堆積岩中に発達するものであり、中には湖成層中のものもあって、軟質と思われる岩石中の断層ほど D_{max}/L が大きい傾向がある。東通原発敷地内にある小断層は、1m 程度の変位を有するものの、10~20m 離れただけでほとんど消滅するという。このような現象は何も異常ではなく、単に岩石が風化して一層軟質になり、延性度が大きくなったためである。

断層が進展する際には、断層先端部での非弾性変形に (散逸) エネルギーが使われる。破壊エネルギー (密度) G_c とは、破壊面を単位面積増加させるのに必要なこの散逸エネルギー

ギーのことである。他方、破壊を進展させる原動力は、断層を取り囲む媒質から解放される弾性歪エネルギーであり、断層が単位面積進展する際に解放される弾性歪エネルギーをエネルギー解放レート G と呼ぶ。 $G = G_c$ が Irwin の破壊基準である (ショルツ(1993) の p.4~14 を参照)。図 2 に示した事例のような D_{max} / L が大きい断層は、媒質が延性的で G_c が大きい。すなわち、 D_{max} / L が大きいことは断層が進展しにくいことを意味するのであって、その断層が tectonic か否かとは無関係なのである。

破壊エネルギー G_c にかかわる最近の進歩を少し付け加えておく。 G は断層の長さ L と応力の 2 乗に比例する。他方、当初、 G_c は物性定数であり、物質種固有の一定値と考えられていた。そうであるなら、クラックが成長して (= 震源核の形成) 一旦 $G > G_c$ となったら、もはや断層の進展は止まらなくなる。これは困ったことで、多様なサイズの地震が発生している現実とは合わない。合うためには、 G_c もサイズ依存的で、地震ラプチャーの全てのスケール領域で、 $G_c \approx G$ であることが要請される。 G_c のサイズ依存性は Zhnag et al. (2003), Tinti et al. (2005), Abercrombie and Rice (2005) などによって次々に明らかにされ、そのメカニズムも Rice (2006), Otsuki (2007) などによって提案されている。地震学的な G_c のサイズ依存性に関する Rice (2005) の解析結果を図 3 として転載しておく。

図 3.
破壊エネルギーのサイズ
(Slip) 依存性。
Rice (2005) から転載。
破線はとりあえず無関係。



それでは安定成長 (震源核の生成) から自発的不安定成長 (地震ラプチャーの進展) への遷移点の特征的サイズ (震源核の臨界サイズ L_c) は存在しないのかということ、そうではない。堆積岩中の小断層集団のフラクタル的性質を研究した Otsuki (1998) や Goto and Otsuki (2004) によれば、サイズ (変位量) 分布と断層変位量の空間分布はべき分布に従うが、観察限界内で小さなサイズ領域に cutoff が現れる。これは「特征的サイズ」(数 cm ~ 1.6m) であり、媒質が延性的であるほど大きい。サイズ分布や空間分布がフラクタル的であることは、個々の断層の活動に伴う応力変化を通じて相互作用しつつ断層集団が成長したことを示唆する。しかし、応力の変化速度がどの程度であったかは不明である。

3. 不安定すべり（地震）の判定

安定/不安定すべりの問題は地震学の核心部分のひとつであり，すべり弱化摩擦構成則や滑り速度状態依存摩擦構成則，あるいは載荷システムの *stiffness* の問題として膨大な研究が蓄積されている．とてもここに述べ尽くすことは出来ないので，例えば，ショルツ (1993) の p.85~111, p184~203, 大中・松浦 (2002) を参照して欲しい．また，最近では摩擦物性パラメータの不均質分布を考慮した数値シミュレーションが多数行われていて，単純な不均質性を導入しただけで，多様なすべり挙動が現れる．これに関しては Hori and Miyazaki (2011), Noda et al. (2013)などが興味深い．均質な断層面を想定して「 $a - b$ が正だから安定」と言い切ることさえ危ない．

東通原発敷地内の断層に関しては，「地震を起こさないと思う」などと言われたりすることがあるが，断層観察だけから判定するのはとても難しい．以前に J. S. Chester に「あなたは断層を見ただけで，*seismic* か *aseismic* か判定できるか？」と質問したことがあったが，当然ながら答えはノーであった．Monzawa and Otsuki (2003)による粉碎粒子の破片対の発見確率や *plane normal vibration* に伴う現象の発見などは，場合によっては有効かもしれない．

引用文献

- Abercrombie, R. E. and Rice, J. R., 2005, Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening? *Geophys. J. Int.*, **162**, 406-424.
- Allmann, B. and Shearer, 2009, Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. *J. Geophys. Res.* **114**, B01310, doi:10.1029/2008JB005821.
- Goto, K. and Otsuki, K., 2004, Size and spatial distributions of fault populations: Empirically synthesized evolution laws for the fractal geometries. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05601, doi:10.1029/2003GL018868.
- Hori, T. and Miyazaki, S., 2011, A possible mechanism of M9 earthquake generation cycles in the area of repeating M7~8 earthquakes surrounded by aseismic sliding. *Earth Planet Space*, **63**, 773-777.
- Kim, Y. S. and Sanderson, D. J., 2005, The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Review*, **68**, 317-334.
- 中田 高, 大槻憲四郎, 今泉俊文, 1976, 仙台平野西縁・長町一利府線に沿う新期地殻変動. *東北地理*, **28**, 111-120.
- Noda, H., Nakatani, M., Hori, T., 2013, Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up — Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities. *J. Geophys. Res.*, **118**, 2924-2952.

- 大中康譽・松浦充宏, 2002, 「地震発生の物理」. 東京大学出版会.
- Otsuki, K., 1998, An empirical evolution law of fractal size frequency of fault population and its similarity law. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, no.5, 671-674.
- Otsuki, K., 2007, Dependence of surface fracture energy on earthquake size: A derivation from hierarchical self-similar fault zone geometry. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L20305, doi:10.1029/2007GL031419.
- Rice, J. R., 2006, Heating and weakening of faults during earthquake slip. *J. Geophys. Res.*, **111**, B05311, doi:10.1029/2005JB004006.
- ショルツ C. H. 著, 柳谷訳, 1993, 「地震と断層の力学」. 古今書院.
- Tinti, E., Spudich, P., and Cocco, M., 2005, Earthquake fracture energy inferred from kinematic rupture models on extended faults. *J. Geophys. Res.*, **110**, B12303, doi:10.1029/2005JB003644.
- Zhang, W., Iwata, T., Irikura, K., Sekiguchi, H., and Bouchon, M., 2003, Heterogeneous distribution of the dynamic source parameters of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JB001889.

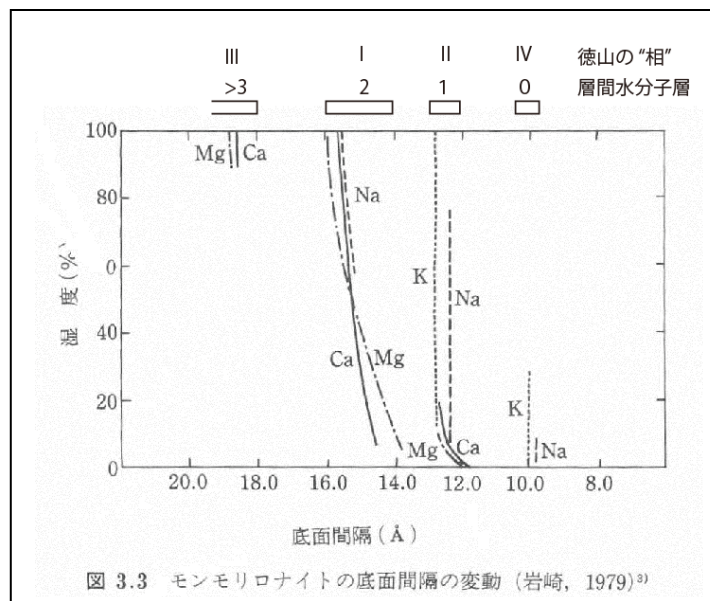
II. “膨張”にかかわる事項

1. モンモリロナイトの“相転移”

第10回評価会合の折に「モンモリロナイトの相転移」なるものが少し話題になったが、以下に少し吟味する。「モンモリロナイトの相転移」なるものが登場するのは「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に係る評価結果 平成24年5月14日」, 地震・津波16-6, (地震・津波15-4改) のp.14である。そこで述べられている“膨張”のストーリーにこの“相転移”が用いられている。すなわち, 「海進に伴ってM1段丘堆積物が堆積している間は地下水位が高かった。海退とともに地下水位が低下し, 地下水位より上の基岩の風化が進行した。原岩に含まれていたモンモリロナイトはI相であったが, 地下水位の低下とともに乾燥してII相になった。その後の再度の海進とともに地下水位も上昇し, 地下水に浸されたII相のモンモリロナイトはIII相に相転移し, 著しく膨張した。」という筋書きである。この“モンモリロナイトの相転移”なるものは, 徳山(1986)による。この研究結果とそこで引用されている岩崎(1979)および白水晴雄(1988)とを底面の格子間隔で比較すると, 下のようになる。

	層間水分子層	底面格子間隔	湿度/温度
IV相	0枚	約 10Å	<20% or >85°C
II相	1枚	12~13 Å	20~70% (常温)
I相	2枚	14~16 Å	60~95% (常温)
III相	3枚かそれ以上	18~19 Å かそれ以上	95%~水浸

格子間隔と湿度の値は陽イオン種によって異なるが、上に示したのは K, Na, Mg, Ca の大まかな値である (下の図 4 を参照のこと)。



徳山 (1986) による注目すべき結果は、地下坑道から採取したモンモリロナイトを多量に含む原岩 (I 相) をそのまま水で飽和させても膨張はわずかで、一旦自然乾燥させて II 相にした後に水に飽和させると体積は 2.3 倍にもなるということである。このときの底面間隔が 19.15~23.48 Å であったという。東北電力はこれを用いて、「海退に伴う地下水位の低下 ⇒ III 相または I 相が II 相に変化 ⇒ 海進で地下水上昇し II 相が III 相に変化・膨張」というストーリーを作ったのであった。徳山 (1986) は I 相と II 相の間は可逆的だと述べているのだが、I 相から III 相への“転移”はさしたる膨張を伴わず、II 相から III 相への“転移”は I 相を通過すると思われるにも拘わらず、著しい膨張を伴うというのは奇妙な結果のように思える。

徳山 (1986) を正しいものと仮定しても、これを東北電力のストーリーのように使ってよいであろうか。問題のひとつは、地下水位面と地表の間の含水比である。浅部の岩盤劣化部では斜長石やモンモリロナイトが溶脱し、ハロサイトが成長しているのだから、一時的にせよ確実に間隙を充たすバルクの水が存在しているに違いない。これは III 相が安定

な状態であり、長雨が続けばこのような状態が実現するだろう。問題は、地下水位面と地表の間に II 相が安定な状態（湿度 20~70%）が本当に実現するのかということである。東北電力のストーリーでは、M1 層堆積以降に 1 回だけ II 相の時期があつて欲しいのであるが、時折 II 相が存在したなら、膨張と収縮が繰り返されるだけである。そもそも、現在の地下水位面と地表との間は I 相が安定な状態なのか、それとも II 相が安定な状態なのだろうか？東北電力はそれさえも明らかにしていない。徳山（1986）の結果が正しいとしても、これらの実証が必要である。

東北電力による調査が進み、当初の「岩盤劣化度とともにモンモリロナイトが増加する」という考えは誤りであることが判明したので、今さらモンモリロナイト問題を持ち出すまでもない。しかし、「III 相での著しい膨張は II 相を経たときのみ」という徳山の結果は興味深いので、追試が行われているはずである。事業者は調べて報告して欲しい。

2. 膨潤変形試験に関して

第 10 回評価会合では標記のことも少し話題になったので、以下に留意点などを述べておく。膨潤変形試験に関しては、東通・現調 3-1「東北電力株式会社 東通原子力発電所敷地内断層（破碎帯）の評価について 平成 24 年 12 月 26 日」の p.71-72 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 と Tr512 は F-4 断層破碎部粘土であり、Tr1631 と TR1632 は F-5 断層破碎部粘土である。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 であつてさえも 0.7% と極めて小さく、他の試験では 0.1% から -0.2% (収縮) であつた。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. 生のデータは示されていないが、他にも 5 つの膨潤試験の結果が表に示されている。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あつて、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碎部粘土のTr-27の最大膨張率が0%なのに対し、それがより低い弱破碎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碎部粘土の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碎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破碎帯粘土部の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那須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”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”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・・・それとも試料採取位地はI相が安定な状態だと言うのなら、それを示すデータが必要だ。

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”発生に十分な膨潤圧”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。

引用文献

- 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.
- 白水晴雄, 1988, 『粘土鉱物学—粘土科学の基礎—』. 185p., 朝倉書店.
- 徳山 明, 1986, モンモリロナイトの4相と大規模地帯りの機構. 北村 信教授記念地質学論文集, 571-586.