

第9回有識者会合に東北電力から提出された『理化学分析結果』の解析

コメント (その6)

東北大学名誉教授 大槻憲四郎

東北電力は大量の理化学分析データを取得していたが、それらの定量的解析結果の全容が示されていなかった。そのため、それらの提出が要請され、第9回有識者会合『添I』として関連データが提出された。以下はそれらを解析した結果である。

I データ解析

I-1 データ解析 (その1) X線回折, 陽イオン交換容量, メチレンブルー吸着量

添Iの9~65には、各トレンチとボーリングから採取された岩石試料の

- ・ X線回折によるスメクタイト含有率(%, 以降 **Xsm** と略記) (注1)
- ・ 陽イオン交換容量 (meq/100g, 以降 **CEC** と略記) (注2),
- ・ メチレンブルー吸着量から推定されたモンモリロナイト含有量(%, **MB** と略記) (注3)

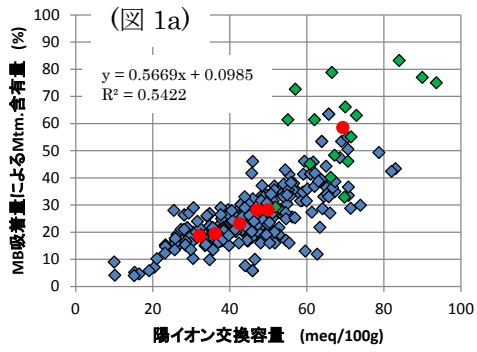
に関するデータが収録されている。以下に岩盤劣化度、および上記3種の分析量との相関を解析した結果を示した。左列にはトレンチからの試料、右列はボアホールからの試料に関する分析結果である。トレンチからのデータとしては、岩質による変化を避けるため、試料数が全体のわずか11%である蒲野沢層からの試料を除外してある。劣化度A, B, C, D, Eをそれぞれ1, 2, 3, 4, 5と数字に置き換えてある。断層破碎帯からの試料(全体の7%)は劣化度Dの2個を除いて24個全てが劣化度Eであるが、母岩の劣化度Eと区別するため、それらには数字6を割り振った(図の緑の菱形)。劣化度を除く他の3つの量の劣化度別平均値を赤丸で示してある。

(注1) Xsmに関して: X線回折によって鉱物種を定量するには、あらかじめ作成しておいた検量線を用いる方法が一般的である。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。

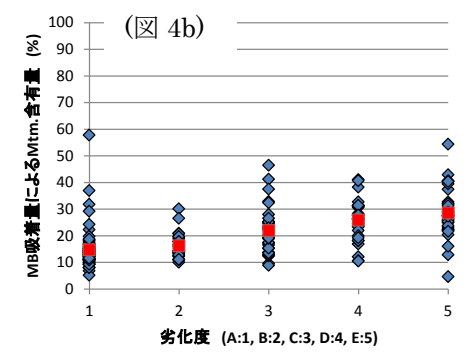
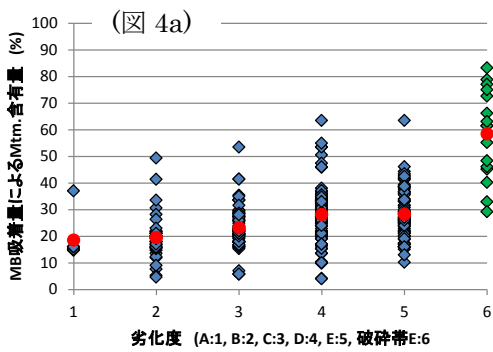
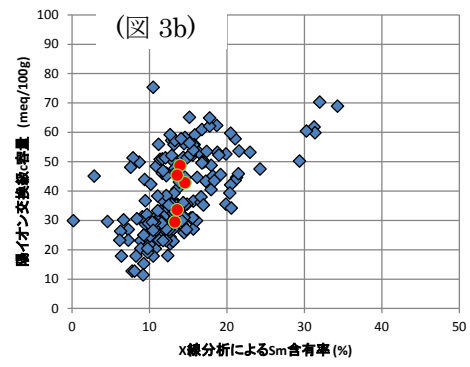
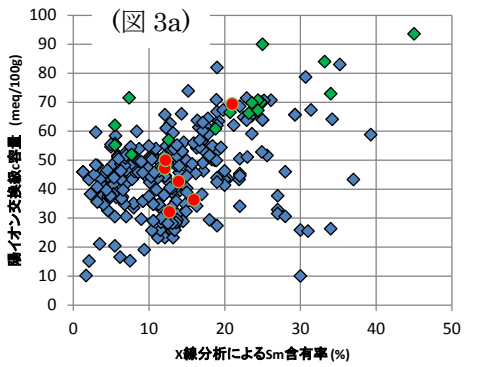
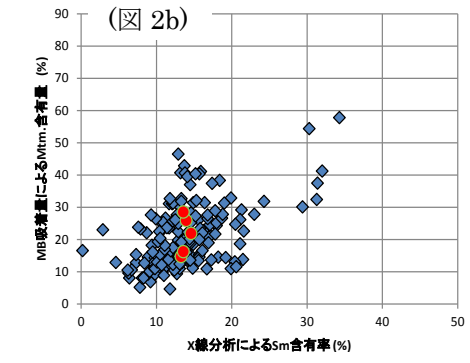
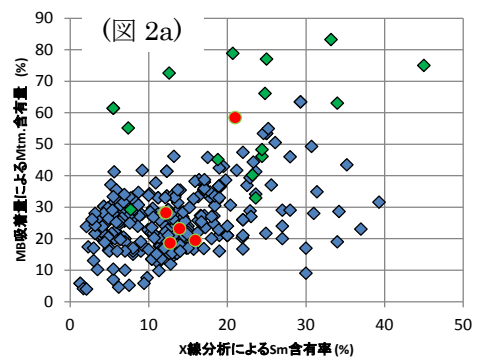
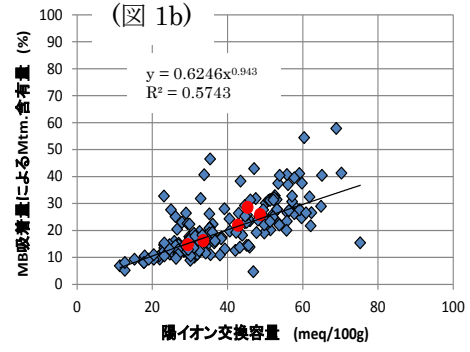
(注2) 陽イオン交換容量CECに関して: 結晶表面や欠陥には不対電子で占められた結合手(dangling bond)があり、ケイ酸塩鉱物の表面は一般に負に帯電しているため、陽イオンを引き寄せる。結晶のエッジは陽イオンを引き寄せる能力の高いサイトであり、ハロイサイトのCECは主にこの機序による。モンモリロナイトの場合は結晶格子内の同形置換(例えばSi⁴⁺がAl³⁺に)が起こるのが普通なので、正電荷の不足が生じ、4面体シートの間にも陽イオンを引き付けている。これらの陽イオンをより侵入し易い陽イオン(例えばNH⁴⁺)と交換することによって、置換可能なdangling bondを定量するのが陽イオン交換容量CECを知る方法である。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。これら2種の粘土鉱物を含む試料のCECはモンモリロナイトとハロイサイトのCECの合計である。東北電力の資料中のCECはこの合計値であることに注意。

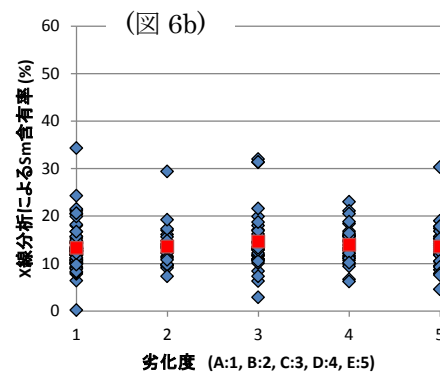
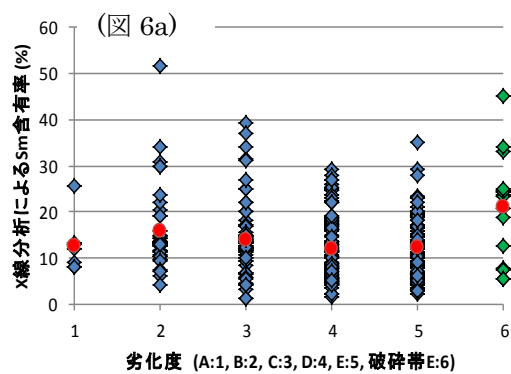
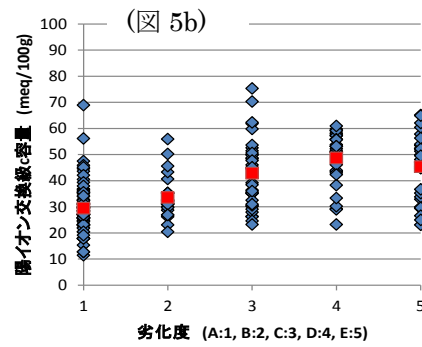
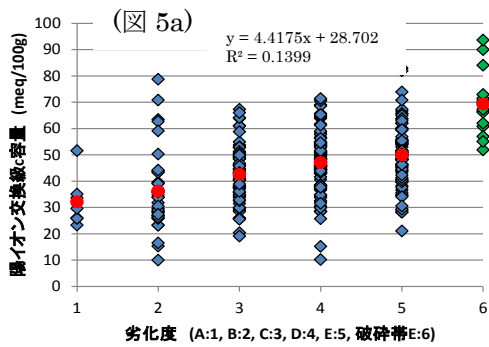
(注3) メチレンブルー吸着量に関して: メチレンブルー(C₁₆H₁₈N₃SCl)は水中では陽イオンとなる。この吸着機序もCECの場合と同じで、陽イオンが大分子であることだけが異なる。利点は、吸着された陽イオンの量を色の変化で定量出来るという簡便さにある。東北電力の報告書ではモンモリロナイトがMBで定量されているかのごとく書かれているが、MBはモンモリロナイトの他、例えばハロイサイトによる吸着量もふくまれていることに注意。

トレンチ



ボアホール



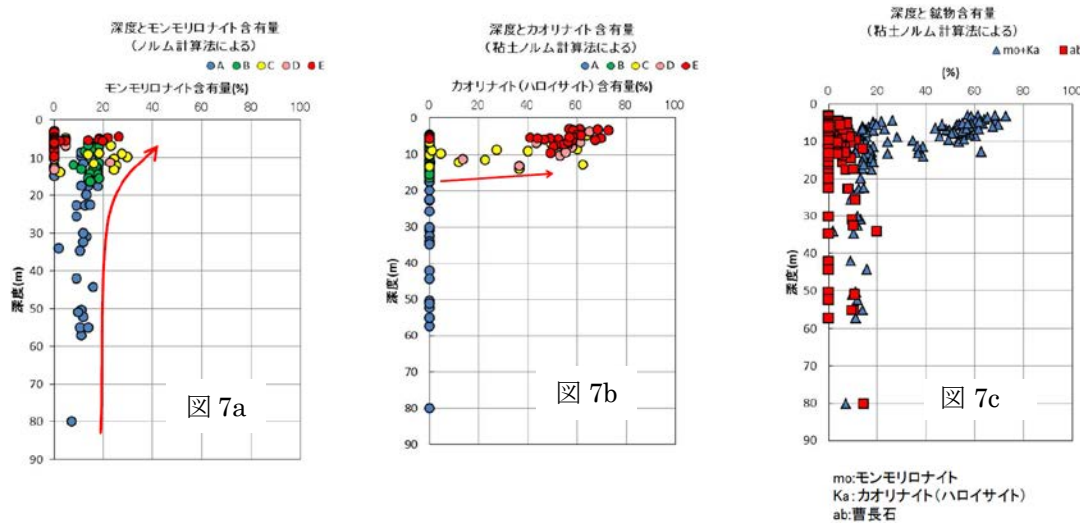


上に示した 12 個の相関図は、以下のことを示している。

1. CEC と MB との間には正相関（線形あるいはべき関数近似で $R^2 < 0.6$ ）がある（図 1a, b）。
2. MB と Xsm とは弱く正相関する（図 2a, b）。
3. CEC は Xsm と弱く正相関する（図 3a, b）。
4. MB は、岩盤劣化度とともに明瞭に増加する（図 4a, b）。とはいつても、劣化度毎の MB の標準偏差が大きいため、線形近似の場合の R^2 は 0.2 以下。
5. CEC は岩盤劣化度とともに増加する傾向がある（図 5a, b）。しかし、ボアホールからの試料では、劣化度 D から E に向かって減少している（図 5b）。
6. Xsm は、岩盤劣化度とともに増加することはない（図 6a, b）。トレンチからの試料に関しては劣化度 A から B に向かって増加するが、劣化度 B から E に向かっては一貫して減少している（図 6a）。ボアホールからの試料では、Xsm は劣化度にほとんど依存せず、ほぼ一定である（図 6b）。
7. 断層破碎帯からの試料（トレンチからの試料にのみある）は、MB（図 4a）、CEC（図 5a）、Xsm（図 6a）のいずれも格段と大きな値を示す。とくに、Xsm（図 6a）は、劣化度 B から E に向かっては一貫して減少しているにも拘わらず、破碎帯からの試料で最高値を示している。したがって、他の劣化度 E とは区別して取り扱わなければならない。

I-2 データ解析 (その2) ノルム計算による鉱物組成解析結果

第9回有識者会合に東北電力から提出された資料 I-18 には、ノルム計算によるモンモリロナイトとハロイサイト含有率の深度変化に関するデータが掲載されている(注4)。この計算値の精度は CEC や MB に比べて高いはずなので、下に図 7a, b, c として転載する。



(注4) 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に限られているので、鉱物組成を精度よく計算できていると思える。

図7は以下のことを示す。

1. 図7aに示されているように、約15m以浅では浅くなるにつれて劣化度が増加し、モンモリロナイト含有率のばらつきが大きくなり、深度に依らず一定(平均して含有率15%程度)か、または劣化度A→B→Cとわずかに増加した後C→D→Eと減少しているように見える(含有率の振れ幅は0~30%)。東北電力はモンモリロナイトが地表に向かって増加するかのように赤線矢印を描いるが、そうはなっていないようだ。
2. 図7bに示されているように、ハロイサイトはモンモリロナイトとは対照的である。それは深度15m付近(劣化度C)までは出現せず、それ以浅で(劣化度C以上)爆発的に増加し、含有率は最高で70%に達する。
3. 図7cに示されているように、モンモリロナイトとハロイサイトの含有率の合計は15m以浅で急増しているが、図7bと見比べれば、急増のほとんどはハロイサイトの急増に因る。曹長石は浅部で減少しているように見える。

I-3 データ解析（その3）X線回折によるスメクタイトとハロイサイトピークの深度依存

東北電力から提出された理化学分析データの中でもうひとつ重要なのは、X線回折チャートに顕れるモンモリロナイトとハロイサイトのピーク高さの深度（劣化度）依存性である。これは検量線法などが介在しない生データなので、その分定性的信頼性は高い。この種のデータの中、第8回有識者会合に提出された資料現調9-2の2.1-20の図を図8として下に転載する。同じような図は第9回有識者会合に提出された資料I-16にも見られる。

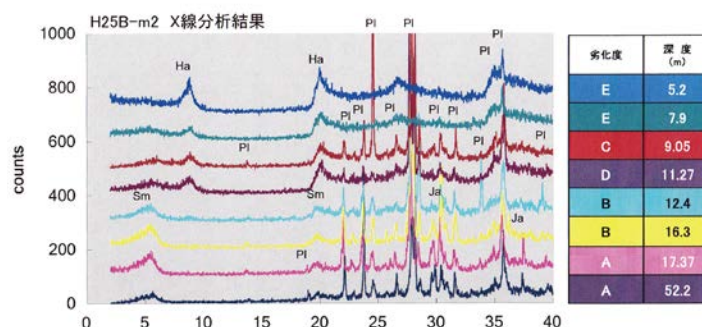


図 8

この図から以下の2つの事が分かる。

1. 深度 52.2m（劣化度 A）から 12.4m（劣化度 B）まではスメクタイトだけが存在し、深度 11.27m（劣化度 D）からはハロイサイトが出現するとともにスメクタイトのピークが顕著に低下する。そして、深度 5.2m（劣化度 E）ではスメクタイトがほぼ完全に消失し、ハロイサイトの顕著なピークだけが残っている。
2. ハロイサイトの出現・増加とともに斜長石のピークが低くなる。このような結果は、劣化度とともにスメクタイトと斜長石が減少・消滅し、ハロイサイトが生成・増加することを端的に示している。

II 議論と結論

II-1 Xsm, CEC, および理化学分析の精度

（注2）と（注3）で述べたように、陽イオン交換容量とメチレンブルー吸着量は粘土鉱物の含有率を定量する簡便法である。注意を要することは、CECやMBにはモンモリロナイトだけではなくハロイサイトも寄与するので、それらの値は主にこれら2つの粘土鉱物含有率の和を代表しているということである。Xsmは検量線を用いて定量されたスメクタイト含有率だと思われるが、当然ながらCECやMBより定量性に優れているはずである。

Xsm, CEC, およびMBの三者の相互相関の中、共に定量性に劣るCECとMBとの相関が

最も良いが、これは両者が同じ機序の陽イオン吸着に関わる量だからであろう。定量性に優れている Xsm と他の 2 つとの間の相関（図 2a, b と図 3a, b）はより良いと期待されるが、そうなっていない。これは、Xsm は高精度でスメクタイトを定量しているにもかかわらず、比較の対象となる CEC と MB は主にスメクタイト+ハロイサイトを定量しているからであろう。このように解釈すれば、一見不可解に見える Xsm, CEC, および MB の三者間の相関の様相を矛盾なく理解できる。

しかしながら、Xsm, CEC, MB の定量性はなお吟味しておくべきであろう。

II-2 スメクタイト・モンモリロナイト含有率は、岩盤劣化度が増加しても増えない

東北電力による岩盤劣化度評価は①褐色化の程度、②割れ目密度、③硬さなどのようである。これらは半定量・半定性的指標なので、当然ながら精度は落ちる。それだけにその精度の吟味は欠かせないのだが、吟味の結果が示されたことは未だ無い。

図 4a, b, 図 5a, b, 図 6a, b の横軸には岩盤劣化度をとってあるが、いずれの劣化度であっても個々の劣化度内での MB や CEC だけでなく、Xsm であってさえばらつきが大変大きい。このことは、劣化度評価の精度が大変悪い、もしくは劣化度と MB, CEC, Xsm との関係が低いことを表わしている、少なくとも Xsm が劣化度の増加とともに増加するという事はない。深度が浅くなっても（岩盤劣化度が増加しても）、モンモリロナイト含有率が増加しないことは、図 7a にも示されている。図 8 に至っては深度が浅くなるにつれて（岩盤劣化度が増加するにつれて）スメクタイト含有率が低くなり、ついには消失することを示している。これらのことによつて「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。

II-3 スメクタイトからハロイサイトへ

私は、小断層 s-19 ボーリング QB-1 の 13m 以深に存在する劣化度 A の岩石であつてさえ、CEC はこのボアホールでの最高値の約 70% にも達しているのだから、大部分のモンモリロナイトは続成作用に伴つて地下水水位面以深で既に形成されていて、後にそれに風化作用（岩盤劣化）が重複したであろうと、既に指摘しておいた（2013/06/25 付けの大槻によるコメント（その 3））。図 7 と 8 はこのことを鮮明に表わしている。これらの図は、深度が浅くなる（劣化度が増す）につれて減少・消滅してしまうスメクタイトに代わり、ハロイサイトが出現・増加することを明瞭に示している。図 7b は、岩盤劣化度とともに（とくに C 以上で）ハロイサイトがゼロから 70% 程度まで爆発的に増えている事を示しているが、劣化度とともに CED と MB が増加したのは（図 4a, b, 図 5a, b）主にこのハロイサイトの爆発的増加によるものと考えられる（（注 2）と（注 3）で述べたように、ハロイサイトも陽イオンを吸着する）。ハロイサイトの増加とともに曹長石も減少していることも重要である（図 7c）。

なぜ岩盤劣化とともにモンモリロナイトと曹長石が減少・消滅し、それに代わつてハロイサイ

トが増加するのか。風化はアルカリ元素やアルカリ土類元素が溶脱し Al に富む過程であるが、モンモリロナイト $((\text{Na}, \text{Ca}_{0.5})_{0.2-0.6}(\text{Al}_{2-y}\text{Mg}_y)\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ → ハロイサイト $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ はまさにこの過程である。カオリナイトーモンモリロナイト型風化では、溶脱帯でカオリナイト/ハロイサイトが、集積帯ではモンモリロナイト/オパールが生成しやすい(歌田, 1991, 『地球表層の物質と環境』)。溶脱帯はより表層部にあつて、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り、そのような PH 条件では斜長石やモンモリロナイトが溶けやすい。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アルカリ性になり、そこではモンモリロナイトが安定に存在し得る。このように、上に述べた地表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事実は、ありふれた当然の現象なのである。

II-4 ハロイサイトの“結晶成長力”が膨張の原因か？

上の検討結果によって、東北電力が挙げ連ねた“体積膨張”の原因のうち、残されているのは“ハロイサイトの結晶成長力”なるものだけになった。この膨張メカニズムは、第 8 回有識者会合で電中研の田中氏が主張したものであった。その根拠の趣旨は『岩盤劣化が進むと (Ti 法で推算した) 膨張量が増し、(それとともに) ハロイサイト含有率も増加するので、膨張の原因はハロイサイトの生成だ』という短絡的なものであり(第 8 回有識者会合配布資料現調 9-2-1-24)、表面がハロイサイトに覆われた粒子同士を **bridge** するように生成したハロイサイト微粒子群の SEM 像を示し、『ハロイサイトが粒子同士を押し広げている』と解釈してみせたのであった(同 9-2-1-21)。このような直観だけでは説得力が決定的に不足している。粒子を押し広げようとするれば応力が発生し、歪エネルギーが蓄えられる。それでも結晶成長し得るかどうかは、ヘルムホルツの自由エネルギーを計算しなければならない。参考までに述べれば、圧力溶解という現象があり、地学でもかなり研究が進んでいる。この場合は粒子間の接触応力が大きいほど弾性歪エネルギーが蓄えられ、これを低下させるために(結晶成長するどころか)接触部が溶解することが、実験的にも熱力学的にも証明されている。

** 追記 1: 応力解析などに関してもコメントしなければならないことがある。しかし、事は順番に片づけなければならないので、それらは次の機会に譲る。