原 著 論 文

掘さく井のカッティング調査による崩壊の判断[†]

藤 井 清 光*・浅 川 忠**

(昭和 39 年 6 月 5 日受理)

Interpretation of the Sloughing of Strata by Cuttings Analysis

By

Kiyomitsu FUJII and Tadashi ASAKAWA

Abstract: Cuttings taken from wells being drilled were analysed to study sloughing of strata. Sand and clay content was determined and the clay was analysed by X-ray diffraction. Results obtained are as follows:

- (1) Contents of sand, clay and montmorillonite in mud-stone differ a great deal between each stratum.
- (2) There is a relationship between the content of sand or montmorillonite and the sloughing of stratum.
- (3) Although much sand in mud-stone usually prevents sloughing, sand with an extremely small amount of montmorillonite results in severe sloughing. Much montmorillonite without sand also results in sloughing.
- (4) The amount of montmorillonite in large sloughed samples is usually greater than that of cuttings.
- (5) There is no relationship between the chloride ion content of the stratum and than the sloughing.

1. ま え が き

我が国のさく井技術に関して最も困難な問題として地層の崩壊がある。これについては、以前から議論はされていたが最終的な結論からは遠い状態にあった。それで数年前より石油技術協会内に崩壊層研究会が作られ、種々の角度より研究されてきた。本文はこの研究会で研究されたものの1部である。

地層の崩壊は当然地層の性質が関係するが、地層の物理的性質に関しては従来、あまり研究されなかった。著者は崩壊の問題の解決には地層の性質の測定がまず必要であることを感じ研究計画をたてた。この研究の分担を下のようにした。

藤井：(1) 全体の計画（試料をとる抗井の決定，試料のとり方，測定方法の決定など）

(2) 測定結果と崩壊の関係の判断

浅川：カッティングの分析

この研究の対象となった抗井は帝国石油会社が掘さくしたもので、潟町 R. 104、宮本 R. 1 および R. 2、築地 R. 4、沖柳 R. 1、大口 R. 17 である。大口 R. 17 のみ昭和 35 年に掘さくされ、その他は昭和 37~38 年に掘さくされた。そしてこれに使用された泥水は大口のみ石膏泥水であり、その他は普通泥水であった。

この種類の研究には試料の採取が重要な意味をもつ。試料の採取は帝国石油会社開発部、各鉱業所および各掘さく現場の好意ある協力のお蔭で、計画通り行なわれた。同社の担当各位に対し、厚く感謝する次第である。

上に記した各抗井またはその附近の抗井（ただし、大口 R. 17 を除く）の崩壊の定量的判断についてはすでに発表された（藤井—1963）。カッティングの調査結果も帝国石油技研報告としてすでに発表された（浅川—1963）。今回の研究は上の2研究の結果を総合的にまと

[†] 石油技術協会崩壊層研究会における研究

* 東京大学工学部 ** 帝国石油中央技術研究所

め、崩壊について新しい結論を求めたものである。

2. 測定方法

ここでいうカッティングとは掘さくの時に泥水に混って数 mm 以上の大きさの固体として上ってきたものである。それで、ビットによって砕かれた砂を含まない。従って、カッティングとは、いわゆる泥岩または砂質泥岩である。掘さく現場より送られて来たカッティング試料は次のように処理され、測定された。

2・1 含水量の測定

試料 100 g を秤量し、105°C で 3 時間熟した後に秤量して含水率を求めた。

2・2 粒度分析

乾燥試料 20 g に水 100 cc を加えて 24 時間放置させた。これをミキサーで約 2 時間かきまぜた後にメスシリンダーにとり、水を加え深さが約 12 cm になるようにした。これを 8 時間静置させた後に、上から 10 cm までの部分を除いた。再び水を加え、同じ操作を上ずみで透明になるまで何度も繰返した。これは 8 時間で 10 cm 以上沈降しない部分を 2μ 以下の粒子とみなしたものである。残ったものを乾燥させ、秤量した。次に、これに再び水を加えて分散させた後に、150 メッシュと 300 メッシュのふるいに通して、残留したものを乾燥し秤量した。以上の結果、150 メッシュ以上（中粒砂以上）、150～300 メッシュ（細砂）、300 メッシュ～ 2μ （シルト）、および 2μ 以下（粘土）の 4 種類に分けられた。

2・3 塩分濃度

乾燥した試料 20 g をエルレンマイヤーフラスコにとり、水 50 cc を加えて 24 時間放置後、約 10,000 r.p.m で高速遠心分離した。この上ずみ 20 cc をとり、モール法で滴定して塩素イオン濃度を求め、含水率で補正して mg/l 表わした。

2・4 X 線廻析分析

乾燥試料を乳鉢で細かくくだき（約 200 メッシュ）、底に水を入れたデシケーターに 24 時間放置して水蒸気を吸収させた。次に、空气中に 24 時間放置して水蒸気吸着量を平衡させた後に、Random Powder 法（粉末のまま型にはめて測定する方法）で X 線廻析を行なった。対陰極に銅、フィルターにニッケルを使い、scale factor 8, multiplier 1, time constant 4 で分析した。

ここで X 線廻析について説明すると、一般に

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

という関係がある。ただし、 n は整数、 λ は波長、 d が結晶格子間隔で Å で表わし、 θ は廻析角度である。従って $n = 1$ とした時に一定の波長の X 線を試料に照射したとき、廻析されてくる角度を測定すれば格子間隔 d が求

められる。それと同時に X 線の量も Geiger Flex の場合、G.M. 計算管で数えられる。この研究に用いられた試料は主として石英、長石、沸石、粘度鉱物からなり、粘度鉱物はモンモリロナイト、イライト、クロライト、などからなる。装置の都合上、後に示す曲線は廻析角の 2 倍の 2θ で示してある。この曲線では 6° 附近のピークはモンモリロナイトの (001) 面の反射ピーク、 9° 附近はイライトの (001) 面、 10° 附近は沸石、 12° 附近はクロライトの (002) 面、 20° 附近は粘土鉱物共通ピーク、 21° 附近は石英の (100) 面の反射ピークである。反射強度は大体ピークの面積に比例するといわれているが、結晶度とかサンプルの粒子の大きさ等によって多少影響をうける。

3. 測定結果

3・1 潟町 R. 104

全く崩壊しない例として潟町 R. 104 のカッティングの測定結果を示す。この坑井においてはキャリパーロッキングは測定されなかったが、この近くの人工島 R. 1 では測定された。その結果（藤井—1963）によれば、この地層は 50 日以上泥水と接触していたが、問題となるような坑径の増加はなかった。そして、一般に潟町地区では作業の障害となるような崩壊は起らないので、潟町 R. 104 を崩壊しない例としてあげた。

まず、この坑井の掘さくの際のカッティングの X 線分析図が第 1 図である。これにより粘度鉱物の成分が明らかとなる。第 1 図より求めたモンモリロナイトのピークの面積と深さの関係が第 2 図である。これによれば、この面積の平均値は約 3 cm^2 であって、他の場所の測定値と比べて、特に多くも、少なくもない。

次にカッティングの粘土の分析結果が第 3 図である。この図の線①は直径 100μ 以上の粒子の混合割合（重量 % 以下同じ）、線②は 50μ 以上の粒子の混合割合、線③は 2μ 以下の粒子の混合割合である。粒子の大きさのみ考えれば、一般に、 50μ 以上の粒子は砂であり、 2μ 以下の粒子は粘土である。この測定結果を他の場所のものと比較すれば、他の場所より、砂はかなり多く、粘土はやや少ない。

次に、カッティングの中の塩分濃度 (Cl mg/l) を表わしたものが第 4 図である。ただし、カッティングは泥水の影響をうけるので、この測定値がそのまま地層の真の値であるかどうかは疑わしい。しかし、測定値は地層の値に、少なくとも比例していると考えてよいであろう。第 4 図は測定値が深さによって異なることを示している。そして、全体より見て、他の場所に比べて、塩分濃度は低い。

第1図 潟町 R. 104 の X 線分析図

第2図 潟町 R. 104—X線分析

モンモリロナイトピーク面積

(cm²)

第3図 潟町 R. 104—粒度分析結果

① <100 μ, ② >50 μ, ③ <2 μ

第4図 潟町 R. 104—塩分濃度

3・2 築地 R. 4

次の測定は中条ガス田の築地（つじ）R. 4 で行なわれた。まず、カッティングのX線分析図が第5図である。この図より求めたモンモリロナイトピークの面積が第6図である。この場所では、所によりモンモリロナイトの含有量は多く、特に900~1500mではかなり多くなっている。第7図は粒度分析結果である。この場所では一般に砂の量は少ない。ただし、800m附近、1600m附近の砂層（ガス層）では砂の量は増加している。第8図はカッティングの塩分濃度である。浅い所では塩分濃度は非常に多いが、深くなるに従って少なくなり、1600mより下では非常に少ない。

崩壊の程度とカッティングの成分の関係について示したものが第9図である。キャリアーによる測定範囲が少ないのが欠点だが、この図はある傾向を示している。すなわち、深度700~1200mにおいてモンモリロナイト

第 5 図

築地 R. 4-X線分析図

第 6 図

築地 R. 4-X線分析モンモ

リロナイトピーク面積

第 7 図 築地 R. 4 粒度分析

第 8 図 築地 R. 4 塩分濃度

第 9 図 築地 R. 4—直径の増加と
モンモリロナイトの面積

が多いと坑井の直径が増加する値向があること、砂が50%以上あると直径は増加しないこと、である。この坑井の1900 mより1920 mの掘さくの間は9コの崩壊ザクを採取しX線分析を行なった。その結果、モンモリロナイトの面積は 3 cm^2 以下は1コ、 $3\sim 4\text{ cm}^2$ は2コ、 $4\sim 5\text{ cm}^2$ は3コ、 5 cm^2 以上は3コとなっている。このことは崩壊ザクの方が（上から落ちてきたとしても）カッティングよりモンモリロナイトの含有量がかなり多いことを表わしている。

3・3 宮本 R. 1 および R. 2

宮本 R. 1 および R. 2 について説明する。R. 1 では泥水ポンプの故障があり、ポンプの能力も小さかった。すなわち、泥水循環が不十分であった。R. 2 では、この点を改めたので崩壊はほとんど発生しなかった。R. 1 のカッティングのX線分析図は第10図であり、R. 2 のカッティングのX線分析図は第11図である。第12図は崩壊とカッティングのモンモリロナイトの面積の関係を示す。第13図は宮本 R. 2 のカッティングの粒度分析結果、第14図は宮本 R. 2 のカッティングの塩分濃度を示す。これらの結果によれば、この地域では、モンモリロナイトは比較的多いこと、砂は比較的少ないこと、塩分は全般的に少ないこと、などの特色がある。第12図にはR. 2 の崩壊ザクのモンモリロナイトの面積が示してあるが、これによれば崩壊ザクの方がカッティングよりモンモリロナイトの量は多い。第12図のR. 1の結果より、崩壊の程度とカッティングのモンモリロナイトの面積の関係を求めたものが第15図である。これによれば、モンモリロナイトの量と崩壊の間には、かなりはっきりした関係がある。すなわち、R. 1においては、モンモリロナイトの面積が約 2.5 cm^2 以上では崩壊しにくい、これ以下では崩壊しやすい。

第 10 図 宮本 R. 1—X線分析図

3・4 沖柳 R. 1

この坑井は深さ1450 m程度までは大きな崩壊傾向はないが、それより深くなると著しい崩壊傾向を示す。一般に砂の多い地層では崩壊しにくいのであるが、ここでは砂が多くても崩壊している。沖柳 R. 1 のカッティングのX線分析図は第16図、これより求めたモンモリロナイトピークの面積と坑井の直径の増加の関係は第17図である。この図には崩壊ザクのモンモリロナイトの面積も示してあるが、これは $2\sim 3\text{ cm}^2$ であり、カッティングの値の平均値には近い。次に、カッティングのモンモリロナイトの面積と直径の増加の関係を求めたものが第18図である。これによると両者の間には、はっきりした関係がない。次に、カッティングの粒度分析結果が第19図である。これにより求めたカッティング中の砂の含有量と直径の増加の関係を表したものが第20図

第 11 図 宮本 R. 2—X線分析図

第 12 図 宮本 R. 1 と R. 2 のモンモリロナイトの面積および直径の増加
ナイトの面積および直径の増加 第 13 図
宮本 R. 2—粒度分析

- ① > 100 μ × ×
② > 50 μ × ×

第 14 図
宮本 R. 2—塩分濃度

第 15 図 宮本 R. 1—モンモリロナイトの
面積と直径の増加の関係

第 16 図 沖柳 R. 1—X線分析図

第 17 図 沖柳 R. 1—モンモリロナイトの
面積と直径の増加

第 18 図 沖柳 R. 1—モンモリロナイトの
面積と直径の増加の関係

第 20 図 沖柳 R. 1—砂の含有率と
直径の増加の関係

第 19 図 沖柳 R. 1—粒度分析

第 21 図 沖柳 R. 1—カッティング中の塩分濃度
およびX線分析石英ピーク高さ

第 22 図 大口 R. 17-X線分析図

第 23 図 大口 R. 17—モンモリロナイトピークの面積および石英ピークの高さの面積および石英ピークの高さ

である。これによれば砂（直径 50μ 以上の粒子）が少なくと直径が増加する傾向はあるが、余りはっきりした関係ではない。

カッティングの塩分濃度およびX線分析の石英ピークの高さを測定した結果が第 21 図である。これらと崩壊の間には特別な関係はないようである。

3・5 大口 R. 17

この坑井は石膏泥水によって掘られたが、深さ 1500 m より崩壊が著しくなり、1960 m で遂に掘さくを止めざるを得なくなった。カッティングのX線分析図は第 22 図であり、これより求めたモンモリロナイトピークの面積および石英ピークの高さは第 23 図である。第 23 図で明らかなようにモンモリロナイトは場所によって、 8cm^2 以上となっているが、著じるしい崩壊傾向を示しているのは $3\sim 6\text{cm}^2$ の部分である。石英ピークの高さより、この地区の地層には砂が少ないことが指定される。この地区は大きな崩壊が発生するので研究価値があるが、上に示した以外の測定結果がないのが非常に残念である。

4. 崩壊に対する判断

以上に測定結果の総てを示したが、崩壊に関しては、すでに部分的に結論が出ているものがある。崩壊に関す

る一般的結論を求めるために、次のように判断する。まず、掘さく井の崩壊の分類をしなければならない。これについては、すでに発表されたもの(藤井—1963)に従って A, B, C の 3 つに分ける。すなわち、A は(実用的な意味において)崩壊しない。B は弱い崩壊をする、C は強い崩壊をする。もし、キャリバーロギングによる測定を行なえば、地層が泥水と接触して約 10 日後の直径の増加に従って地層を分離する。すなわち、直径の増加が 1.5 in 以内は A、1.5~3.0 in は B、3 in 以上は C とする。ある地区に掘った掘さく井において、掘さく作業が不適当なために特定の地層が B または C の崩壊を起したとする。同じ地区に掘った坑井が、適当な掘さく作業のために全く崩壊しなかったとする。この時には、前者の B または C の分類になった同じ地層は後者の坑井においては B の分類にするものとする。

以上の 3 種類の分類の図における符号を次の () の中のように表わす。すなわち、A (○), B (●), C (×) とする。

全体の様子を知るために、前に示した総てのモンモリロナイトの面積および砂の含有率と深さの関係を第 24 図に示す。これは 100 m 毎のおおよその平均値を表わす。この図によれば、場所によって(また、地層によって)モンモリロナイトまたは砂の含有率にかなり差があることがわかる。しかし全体としては、モンモリロナイトは $2.5 \sim 4.5 \text{ cm}^2$ の範囲、砂は 10~25% の範囲のものが最も多い。

砂の含有率と粘土 (2μ 以下の粒子) の含有率の関係を表したものが第 25 図である。これによると、これらの成分と崩壊の間には特別な関係は認められない。

それで、次にモンモリロナイトの面積と砂の含有率の関係を第 26 図に表して判断する。この図によると A のみの区域、ABC が混った区域、BC の区域の 3 つに分けられる。砂が割合に多くてもモンモリロナイトの面積が 1.2 cm^2 以下では C となっている。砂が 10% 以下に少なくなると、崩壊傾向がある。ABC が混った区域が島になって存在するのは不思議であるが、今回行った測定の結果はこうになった。

第 25 図と第 26 図を比較して、粘土の場合には崩壊との関係が明らかでないが、モンモリロナイトの場合には崩壊との関係がかなり明らかである。このことは、崩壊に関しては粘土全体が関係するのではなく、粘土の中のモンモリロナイトだけが関係することを意味する。このことは粘土鉱物の膨潤性が崩壊に関係することを表わしている。

水を吸ったモンモリロナイトは膨潤性が大きいから、他の粘土鉱物の場合より流動性が大きい。それで小

第 24 図 モンモリロナイトの面積および砂の含有率

第 25 図 砂の含有率と粘土の含有率の関係

第 26 図 砂の含有率とモンモリロナイトの面積の関係

さな砂の粒の間まで入りこみ全体の物理的安定性を大きくすると考えられる。もし水と共存している粘土鉱物が大きな圧力を受けた時には、膨潤性の小さい粘土鉱物では直ちに水を放出し、その水が粘土の外側に存土するために全体の結合力が小さく不安定な状態になる。これに反し、モンモリロナイトは圧力を受けても多量の水を粘土鉱物の中に含み得るので遊離水が存在せず、大きな結合を持った安定な状態を保つと考えられる。すなわち、砂またはシルトを成分とした泥岩では、ある限界値

以上のモンモリロナイトが必要である。砂の含有率が20%以上であれば、この限界のモンモリロナイトは1.2 cm²の面積に相当するものである。砂の含有率が20%以下ではシルトがそれだけふえるので結合力を増加するためにモンモリロナイトを多く必要となる。以上が第26図の下の部分から左の部分に対する説明である。

地下で非常に高い圧力を受けて砂、シルト、モンモリロナイトの混合物が存在する場合に、どのような含有率の時に物理的に最も安定かという点については、現在では明らかでない。第26図の島の部分は、時には、崩壊することを意味するもので、その周囲の混合割合の物質より物理的に弱い性質をもっていると考えられる。

第26図の資料となったものは沖柳、潟町、築地、宮本の4カ所の坑井に過ぎない。今後は、もっとこの種類の調査を行ない地層の成分と地層の物理的性質について研究すべきである。

以上の説明のように、限られた記録を整理したものはあるが、第26図より砂とモンモリロナイトの混合割合の程度によって、崩壊についてA、B、Cの3つに分類されることが明らかとなった。従来は坑井の崩壊の原因については、部分的にしかわからず、一般的な説明はほとんど不可能であった。しかし、この研究により崩壊の原因の一般的な説明がかなり可能となり、少なくとも崩壊に関する今後の研究方向が明らかとなった。

5. 結 論

数本の坑井のカッティングを調査して成分を明らかにし、坑井の崩壊に関する研究資料とした。この研究で得られた結論は以下のものである。

(1) 崩壊を対象として、掘さく井の地層の岩質を上から下まで組織的に調査したことは我国では今回が初めてである。その結果、カッティングの中の砂、シルト、粘土、モンモリロナイトの含有率および塩分は各地層によって大きな差があることが明らかとなった。

(2) 坑井の崩壊には泥岩中の砂の含有率およびモンモリロナイトの含有率が大きく関係する。

(3) 泥岩中の砂の含有率とモンモリロナイトの含有率の関係より崩壊の判断が出来る(第26図)。一般には砂が多くモンモリロナイトもある程度以上あれば崩壊は発生しにくい。モンモリロナイトがある程度以下になると、砂が多くてもひどく崩壊しやすくなる。砂が5%以下では崩壊しやすい。砂とモンモリロナイトがともに中程度ある時に崩壊が発生することがある。

(4) カッティングおよび崩壊ザクのモンモリロナイトの含有率については、両者の間に差がないことがあるが、崩壊ザクにおける値が高いことが多い。

(5) 地層に含まれる塩分は崩壊に関係ないようである。

(6) この研究により坑井の崩壊の原因の説明がかなり可能となった。そして、また最終的結論を得てはいないが崩壊に関する今後の研究方向が明らかとなった。

参 考 文 献

- 浅川忠, 1963, 坑井崩壊に関するカッティング調査, 帝石技研報告 15 巻3号, 61~82 頁
藤井清光, 1963, キャリパーロギングによる崩壊の判断, 石技誌 28 巻4号, 137~141 頁