

ハイドロフラクチュアリングとマグマフラクチュアリング

1. デンバー地震

小出 仁 (地震地質課)

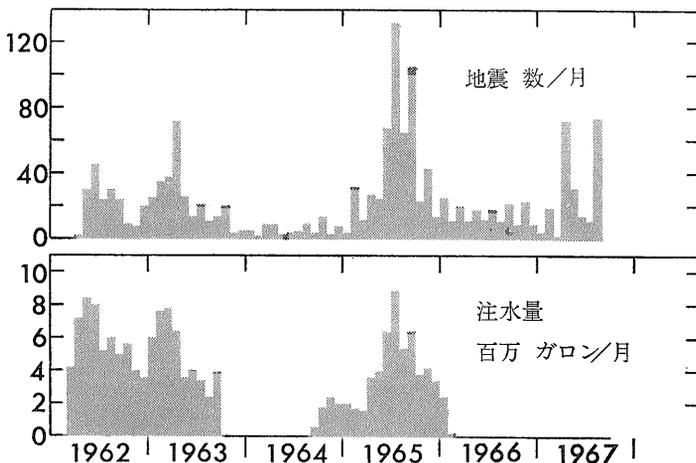
はじめに

ハイドロフラクチュアリング (Hydrofracturing 又は Hydraulic fracturing) という言葉は 聞いたことがある人もおられると思うが マグマフラクチュアリング (Magmafracturing) という言葉はほとんどの人が聞いたことがないと思う。しかし ハイドロフラクチュアリングやマグマフラクチュアリングは 地下の見えない所で様々ないたずらをしており 我々の生活にまで影響を与えていることが 最近になって知られるようになってきた。水やマグマなどの流体が地下の岩石を破壊し そのために火山の噴火や地震や地すべりを引き起こし 他方では有用な各種の鉱床や地熱地帯を作るといのである。水のような流体が どうしてあの硬い岩石を壊すのか不思議に思う方も多だろう。何分にも 地下の見えない所で起こっている現象なので 現在でもよく解らないことが多い。しかし 水などの流体が地かくの変動に大きな影響を与えているのは確実である。この現象をうまく使えば 地下の流体圧をコントロールして 地下の状態を測定したり 地震や噴火のコントロールもできるようになるかもしれない。そのためには ハイドロフラクチュアリングの機構を正確に理解する必要がある。

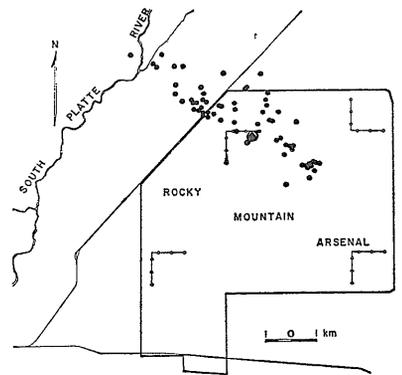
雨だれでも長い間には石に孔をあけてしまし 河の

流水も岩石を浸食する。この現象は 水自身や水中に懸濁している固体粒子が岩石に衝突して わずかずつ削削するために起きる。高圧の水を細いノズルから放水して得られる高速の水流 (ジェット) を 鉱層にぶつけて破砕する水力採鉱 (炭) 法という方法がある。水力採鉱法は 比較的軟弱な砂鉱や石炭の採掘に用いられ 水圧も通常数10気圧程度である。しかし もっと高圧のポンプを用いて超高速のジェット水流を出せば コンクリートやもっと硬い岩石の切断もできる。このような水流による破砕も 一種のハイドロフラクチュアリングには違いない。しかし ごく特殊な場合以外には 地下での流れはきわめてゆっくりしているから 流れによる破壊は地下では重要でない。

流れのほとんどない 静的な水の力による岩石の破壊は可能であろうか。風船に水をどんどん押し込むと いつかは破裂する。鋼鉄製の中空の容器でも 高圧ポンプで注水してどこまでも超高圧にすれば (できれば) 最後には破裂する。同じように岩石中の空洞に高圧の水を押し込んで破壊することができるかもしれない。しかし 破壊するにはどの位の圧力が必要か? 地下に都合よく空洞があるか? 圧力が上がる前に漏れてしまわないか? それから 天然にも高圧が発生しうるか? そもそも 地下に水や他の流体がどの程度普遍的に存在



I-1図 デンバーの廃水井付近の月別地震数と注水量の関係(M. W. MAJOR and R. B. SIMON 1968 Quart. Colorado School of Mines, 63, 9-55).



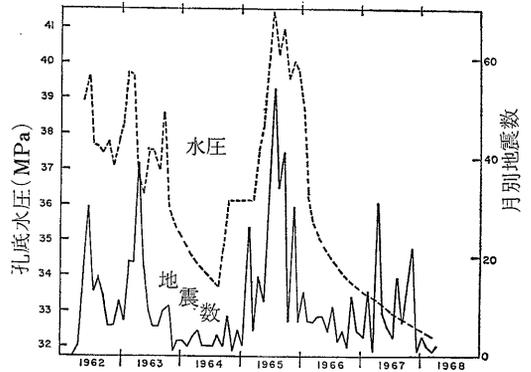
I-2図 デンバーの廃水井付近で1966年1月と2月に発生した地震の震源分布 丸中の三角が廃水井 黒丸が震源 (位置精度は1km以内) (HEALY 1968).

しうるか？ このような疑問が たちまち出てくる。
 そのため 可能性はかなり古くから考えられていたにも
 拘わらず ハイドロフラクチュアリングの重要性が一般
 に認識されるようになったのは デンバーで起きた偶発
 的な事件以後であるといってもよい。

デンバーの「人工」地震

1962年の春頃から 米国コロラド州のデンバー市の北
 の地域で 不思議な小地震が起こり始めた。 その後 4
 年の間に 僅かの被害を起こすような地震もいくつか起
 きた。 デンバーでは約80年の間 有感地震は無かった
 し地震計が置かれた30年の間 マグニチュード3以上の
 地震は無かった。 1965年にコロラド鉱山大学の Yung-
 Liang Wang という大学院生が 地震の震源は市のすぐ
 北の地域に集中していることを示したが 多くの地震学
 者は未だこの群発地震は天然現象と考えていた。 1965
 年11月に David Evans という地質コンサルタントが
 デンバー市の北の軍需工場にある深さ約 3,700m の井戸
 に排水を圧入したために群発地震が起きているという大
 胆な仮説をテレビで発表した。 この考えは 当初地震
 の専門家からも また専門家以外からも批判を受けた。
 しかし I-1図を見るとすぐ分かるように 1962年に廃水
 の注入を始めてから 1~2 ヶ月後に地震が起こり始め
 1963年に注入を中断すると 地震の数は少なくなり 約
 1年の中断後少量の注入を再開すると 地震数が少し増
 えはじめ 1965年に注入量を増加すると 以前にも増し
 て活発になった。 地震と廃水注入との間に何らかの関
 係がある可能性は濃厚であった。 そこで 軍や米国地
 質調査所やコロラド鉱山大学の研究者が 詳しい研究を
 行った (HEALY ら 1968, HOLLISTER and WEIMER,
 1968)。

震源を精密に決定すると 廃水井を通る N40°W 方向
 に伸びた 長さ10km 幅 3km の帯状のゾーン内で地
 震が起きていることが分った (I-2図)。 震源の深さは
 4.5~5.5km であるから 廃水井の底より少し下方で起
 きている。 HEALY ら (1968) によって見積られた
 孔底付近の水圧と地震数はきわめてよい相関がある
 (I-3図)。 地下では それより上に存在している岩石
 の圧力をすべて下の岩石が支えているために大きな圧縮
 力が岩盤に加わっている。 地下 3,700m の深さではお
 およそ 83MPa (MPa:メガパスカルは国際単位系 SI の応力
 ・圧力単位で 1MPa=10バール=10.1972kgf/cm² に当る。
 したがって 83MPa=830バール である。 SIについては 地質
 調査所月報 第29巻 第4号 p253 1978参照) の圧力が岩
 石に加わっている (小出 1976)。 ところが 36~41
 MPa の水圧で地震が発生している (図 I-3)。 つまり



I-3図 デンバーの廃水井底での水圧と月別地震数 (M1.5 以上) と
 の関係 (HEALY ら 1968)。

岩圧より水圧の方が小さいにも拘わらず 水圧によって
 岩石が破壊するのは 何故であろうか？ 実は デンバー
 地震が起こる前にこの問題を考えていた人々がいた。
 それは M. K. HUBBERT とその共同研究者達である。

HUBBERT と有効応力説

M. K. HUBBERT の名は最近一躍有名になった。 そ
 れは石油危機が発生する前から 将来石油危機が起こる
 ことを予言していたためである。 HUBBERTの論旨は明
 快で 人口増加や経済成長を考えると石油消費量は急速
 に伸びるが 石油埋蔵量には限度があるので 西暦2000
 年頃から石油生産量は急速に減り 21世紀前半で石油は
 ほとんどなくなってしまうという。 つまり石油に関す
 るマルサス論とでもいえようか？ しかし HUBBERTが
 一躍有名になつたのは 一般の人々の間のことであつて
 地質学者仲間ではずっと前から構造地質学の大家として
 有名であった。 HUBBERTの構造地質学関係の主な論文
 は HUBBERT (1972) に掲載されており それぞれ重要
 な論文だが 現在に至るまで大きな影響を与えているの
 が ハイドロフラクチュアリングに関する論文である。
 HUBBERTは 米国地質調査所に入る前は石油会社に所属
 していた。 そこで彼は奇妙な難かしい問題に遭遇した。
 石油井を掘る際に 通常は泥水 (泥をまぜて比重を重く
 した水) を 石油井内に循環させ 尖端のビットを冷却
 し また削られた岩石を地上に流し出す。

この際に 油田のガス圧より水圧が低いと ガスが噴
 き出してしまふ。 ところが水圧を高くしすぎると 急
 に泥水が地上に戻ってこなくなり 水圧が下がってしま
 う。 急に水圧が下がると ガスが急に噴出し 重大な
 事故になることがある。 水圧が急に下がるのは 地下
 に割れ目が生じて 泥水が岩盤中に流れ込むためと思わ
 れる。 ところが地下で割れ目が発生した時の水圧は意

外に低いと推定されるのである。地下のある深さの岩石には だいたい上に乗っている岩石の密度と深さの積にあたる圧縮応力が 上下方向にかかっている (上載岩圧)。ところが 上載岩圧の3分の2程度の水圧で地下に割れ目が発生することがある。又枯渇しかけた油井に水を圧入して わざと岩石中に割れ目を作り 石油が油井に流れ込む通路を人工的に作って 油井を若返らせる方法も しばしば行われるようになっていた。そのためにも どの程度の水圧で割れ目が生じるかを知る必要があった。

HUBBERT ら (HUBBERT 1972 収録の HUBBERT and WILLIS, 1957 および HUBBERT and RUBEY 1959 参照) は 予想外に低い水圧でも地下の岩石に割れ目が生じる場合があるという問題に答えるために TERZAGHI の有効応力説を応用した。I-4図はきわめて間隙の多い岩石や土の中の一部を拡大したもので 粒子と粒子の間は水で充たされている。このような岩石が圧縮されると 固体粒子が変形し 間隙の大きさも縮められる。ところが内部の水の圧力は間隙を上げようとするので 圧縮応力の一部は間隙内の水の圧力で支えられる。ある断面での応力 (または圧力) の分布を概念的に示すと I-4図のようになるから 水圧と固体粒子内の応力の和が 岩石全体として応力 S に等しい筈である。水圧を p とし 固体粒子内の応力の平均を σ とすれば 岩石中の適当な断面を考えた時に その断面における間隙の部分の面積と断面全体の面積との比を f_b (境界間隙率 boundary porosity) として

$$S = f_b p + (1 - f_b) \sigma \quad \dots\dots(I-1)$$

と表わせる。岩石の破壊に直接関係するのは 全体の応力 S より 固体粒子内の平均応力 σ であるというのが TERZAGHI の考えである。通常の岩石の間隙率から見れば f_b は 1 よりずっと小さいはずである。ところが強度をうまく説明するためには f_b は 1 にきわめて近いと考える方がよい (1 以上にはならない)。つまり ほとんど間隙ばかりで 固体部分はきわめて僅かしかないので (見かけ上) なる。 $f_b \approx 1$ とすれば I-1 式は次のように省略できる。

$$\sigma = (S - p) / (1 - f_b) \quad \dots\dots(I-2)$$

I-2式中では $(1 - f_b)$ がごく小さいとあれば σ はきわめて大きくなる。しかし 今絶対値は問わないとすれば f_b は物質定数であるから 岩石の強度は $(S - p)$ の値により左右される。そこで 有効応力 σ_e を

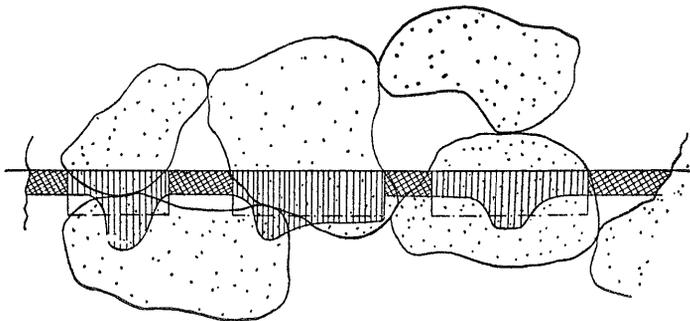
$$\sigma_e = S - p \quad \dots\dots(I-4)$$

とすれば 強度は全応力 S の関数ではなく 有効応力 σ_e の関数になる。ここで p は全応力の内 で強度に関係しない成分なので 中立応力 neutral stress と呼ぶ。

岩石破壊強度は 比較的小さな圧縮応力下では簡単なクーロン条件式がよくあてはまることが多い。クーロン条件式は摩擦法則に形式上類似しており 剪断強度 τ と垂直応力 S は次のような関係になる。

$$\tau = \tau_0 + S \tan \phi \quad \dots\dots(I-4)$$

ここでは τ_0 は $S=0$ の時の剪断強度で 粘着力と呼ば



- ▨ 間隙水圧
- ▧ 固体粒内の応力分布
- 固体粒内の平均応力

I-4図
間隙の多い岩石または土中の応力分布の模式図。
間隙は水で充たされている (W. L. MOORE 1961
G. S. A. Bull., 72, 1581-1586)。

れる。 ϕ は摩擦角に対比して 内部摩擦角と呼び 多くの岩石で $\phi \approx 30^\circ$ くらいである。つまりクーロン条件式は 垂直応力 S が大きくなれば 岩石の強度は直線的に増加することを示している。ところが 前述の議論によれば岩石の強度は全垂直応力 S ではなく 有効応力 σ_e に関係している。したがって クーロン条件式 (I-4) は 次のように書きかえられるべきであるというのが TERZAGHI の主張である。

$$\tau = \tau_0 + \sigma_e \tan \phi = \tau_0 + (S - p) \tan \phi \quad \dots (I-5)$$

つまり全応力 S が大きくなっても 間隙圧 p も大きくなれば 岩石の剪断強度は増加しない。地下深部では 垂直応力は非常に大きいので 間隙圧が小さければ 岩石は地表近くよりずっと大きな強度をもつ。そのため地質的原因でかなり大きな剪断力が加わっていても何事も起こらないことがありうる。ところが その時に間隙圧を少しでも増加させると 岩石の強度が低下して破壊が始まってしまう。HUBBERTらはここに 僅かな水圧上昇で地下に破壊が起こる秘密があると考えた。つまり破壊のためのエネルギーの主な源は地質的原因で蓄えられていた歪エネルギーで 水圧上昇は破壊の引き金になっただけなのである。

先に述べたデンバーの人工地震の場合の HEALY ら (1968) の見積りを例にして ハイドロフラクチュアリングの効果を説明しよう。デンバーの廃水井では 水圧 36.2MPa 以下の時は水は岩石中にあまり流出しないが 36.2MPa 以上で急に流出量が増加することが分っている。I-3図を見ても 36MPa 付近より水圧が大きい時に地震回数が多いことが読みとれる。そうすると 36.2MPa が地下の水の通路 すなわち岩石中に生じた割れ目を開いておくために必要な最低の水圧であろうと推定される。HUBBERTによれば 割れ目を開いておくために必要な最低の水圧は割れ目に垂直な圧縮応力に等しい (すなわち 割れ目に垂直な方向では有効応力 $\sigma_e = 0$)。割れ目は 大抵最小応力に垂直な方向に生じるので 最小応力 36.2MPa と推定できる。他方 前述のように深さ約 3,700m の孔底付近で 83MPa の岩圧が鉛直方向に作用しているので 最大応力は少なくとも 83MPa 以上である。

HEALYらの推定では 廃水注入前の孔底付近の間隙水圧は 26.9MPa であったが 注入によって 38.9MPa になった時に初めて地震が発生しはじめた (I-3図)。地下の岩石に加わっている地かく応力は急には変化しないので 前述のようにおおそ最大応力 83MPa 最小応

力 36.2MPa (中間応力も 83MPa とする) であったと考えられる。デンバーの地震は廃水井を通る断層に沿って発生しているので 断層の方向と最小応力の方向が約 60° をなすと仮定すれば 断層帯に対する垂直応力は 47.9MPa で 剪断応力は 20.3MPa と推定できる。注入前の有効応力は $47.9 - 26.9 = 21$ MPa であったが $47.9 - 38.9 = 9$ MPa に有効応力が低下した時に破壊が起こったわけである。クーロン条件式 (I-3) で $\phi = 30^\circ$ とすれば 粘着力 τ_0 はおおそ 15MPa と計算できる。この粘着力の値は 地下の岩石としてはほぼ妥当な値である。

デンバーで起きた「人工」地震は やはり廃水の圧入によるものであった。しかし 地かく内に地質的な原因によって剪断応力が蓄積されていなければ いくら廃水を圧入しても 地震は起きなかったことが分る。つまり水圧入は引き金の役割をして 自然に蓄えられていた歪エネルギーが解放されたにすぎない。これを利用して 地かく内に大きな歪エネルギーが蓄積される前に ハイドロフラクチュアリングをしてエネルギーを解放し 大きな地震を防ごうという試み (地震コントロール) が米国で行われている (USGS 1973)。また ハイドロフラクチュアリングによって 地かく内の応力を推定することもできる。地かく内の応力を知ることは 地震予知にぜひ必要な情報である。また地下の高温の岩体に水圧入をして 地熱を取り出すこともできる。さらに石油等を地下に備蓄する時にもハイドロフラクチュアリングの知識が必要である。このように HUBBERT らの研究は 予想もしなかったような多くの方面に役立つところがある。

しかし 賢明な読者はこの記事の説明に割り切れなさを感じていると思う。それは一部はあまり簡略化しすぎたためである。例えば応力や強度の用語の使い方はもっと厳密に説明する必要がある。だが それ以上にもっと根本的な問題点がある。有効応力説やクーロン破壊説は 土のような粒子の集合体では 説得力がある。しかし 間隙率が数パーセント以下の岩石でも $f_0 \approx 1$ と言えるのであろうか? HUBBERTらは この難点を超えるために 岩石粒界の粘土等の固体にも間隙圧が伝播し 中立応力になると考えた。しかし この説明もあまり一般的に通用するとは思えない。実はその答のヒントは I-4図にある。TERZAGHI は 破壊が固体粒子内の平均応力に関係すると考えた。ところが 割れ目は平均的な応力より 特別に高い局部的応力 (応力集中) によって発生する。だから I-4図の応力のピークをむしろ問題にすべきである。I-2式で f_0 が 1 に近