

1978.10 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, I, デンバーの地震, 地質ニュースNo.290, 小出仁

ハイドロフラクチュアリング マグマフラクチュアリング 1. デンバー地震

小出仁 (地質調査所地震地質課)

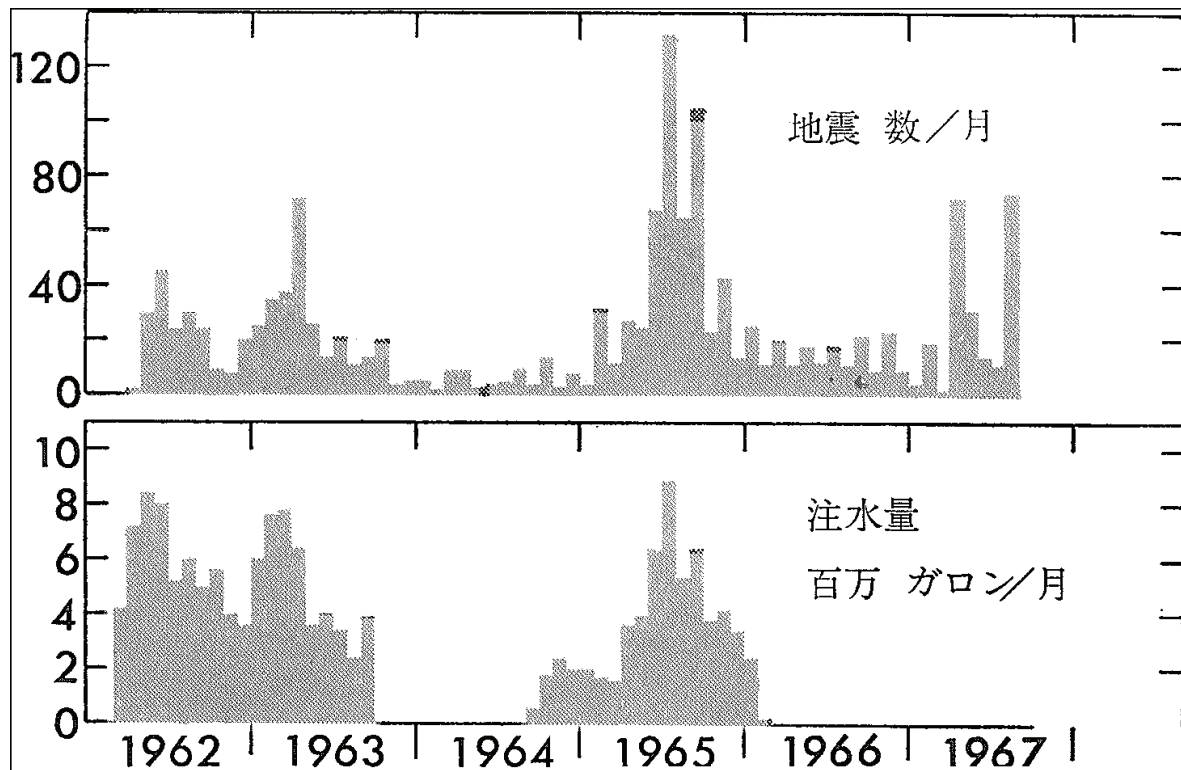
はじめに

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うのである。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いだろう。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、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 水を押し込んで破壊することができるかもしれない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。

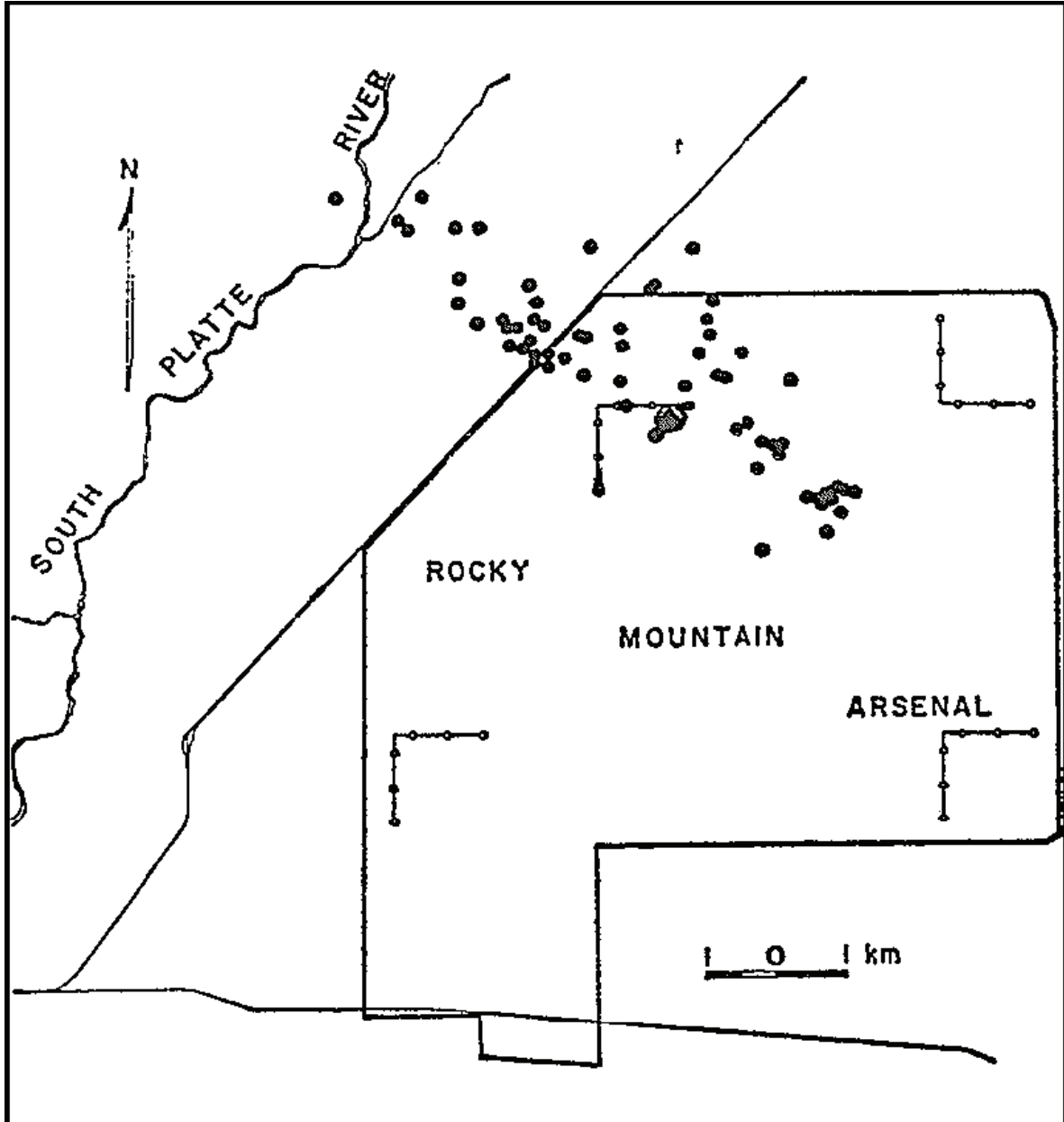
雨だれでも長い間には石に孔をあけてしまうし、河の流水も岩石を浸食する。この現象は 水自身や水中に懸濁している固体粒子が岩石に衝突して、わずかずつ削剥するために起きる。高圧の水を細いノズルから放水して得られる高速の水流(ジェット)を鉱層にぶつけて破碎する水力操鉱(炭)法という方法がある。水力採鉱法は比較的軟弱な砂鉱や石炭の採掘に用いられ水圧も通常数10気圧程度である。しかし、もっと高圧のポンプを用いて超高速のジェット水流を出せばコンクリートやもっと硬い岩石の切断もできる。このような水流による破碎も一種のハイドロフラクチュアリングには違いない。しかし、ごく特殊な場合以外には地下での流れはきわめてゆ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压にすれば(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。



1-1 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).



1-2 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ら 1968）

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。

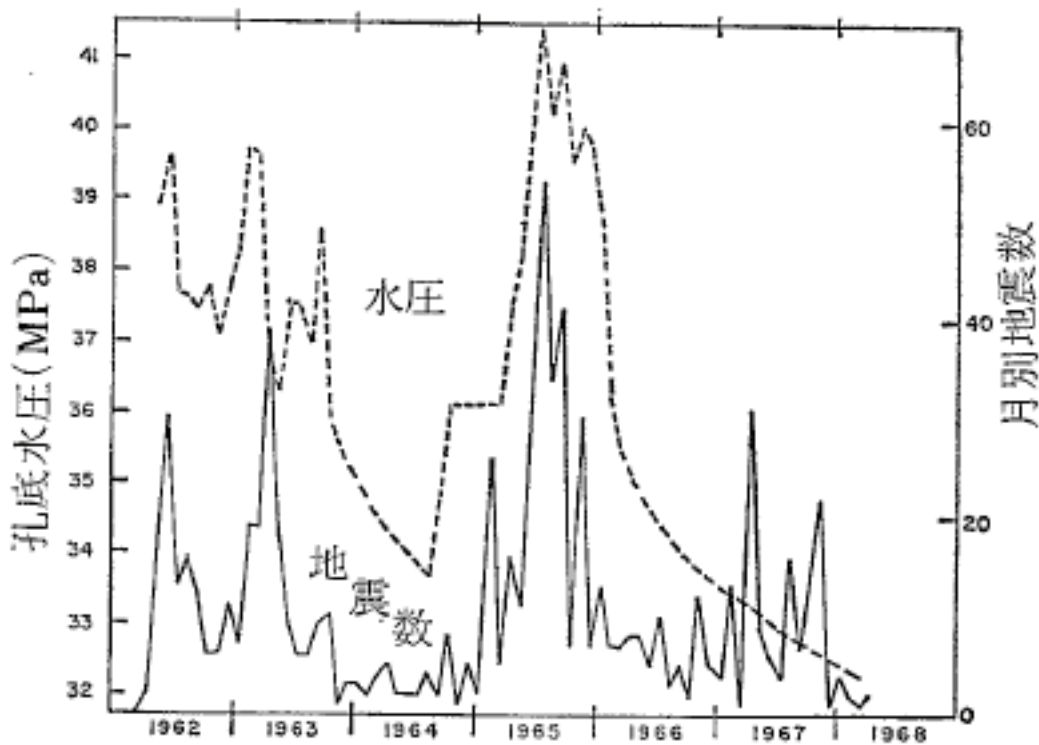
しかし、1-1 図を見るとすぐ分るように、1962年に廃水の注入を始めてから1～2ヵ月後に地震が起り始め、1963年に注入を中断すると地震の数は少なくなり、約1年の中断後少量の注入を再開すると、地震数が少し増えはじめ、1965年に注入量を増加すると以前にも増して活発になった。地震と廃水注入との間に何らかの関係がある可能性は濃厚であった。そこで 軍や米国地質調査所やコロラド鉱山大学の研究者が詳しい研究を行った (Healyら,1968、 Hollister and Weimer,1968)。

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 (1-2 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(1-3 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 =110バール \approx 10.1972 kgf/cm $_2$ 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研月報 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 36～41MPa の水圧で地震が発生している(図 1-3)。つまり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 デンバー地震が起き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。M. K. 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、西歴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おうという。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、M. K. Hubbertが一躍有名になったのは 一般の人々の間のことであっ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。M. K. Hubbertの構造地質学関係の主な論文は、M. K. 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。M. K. 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、突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。

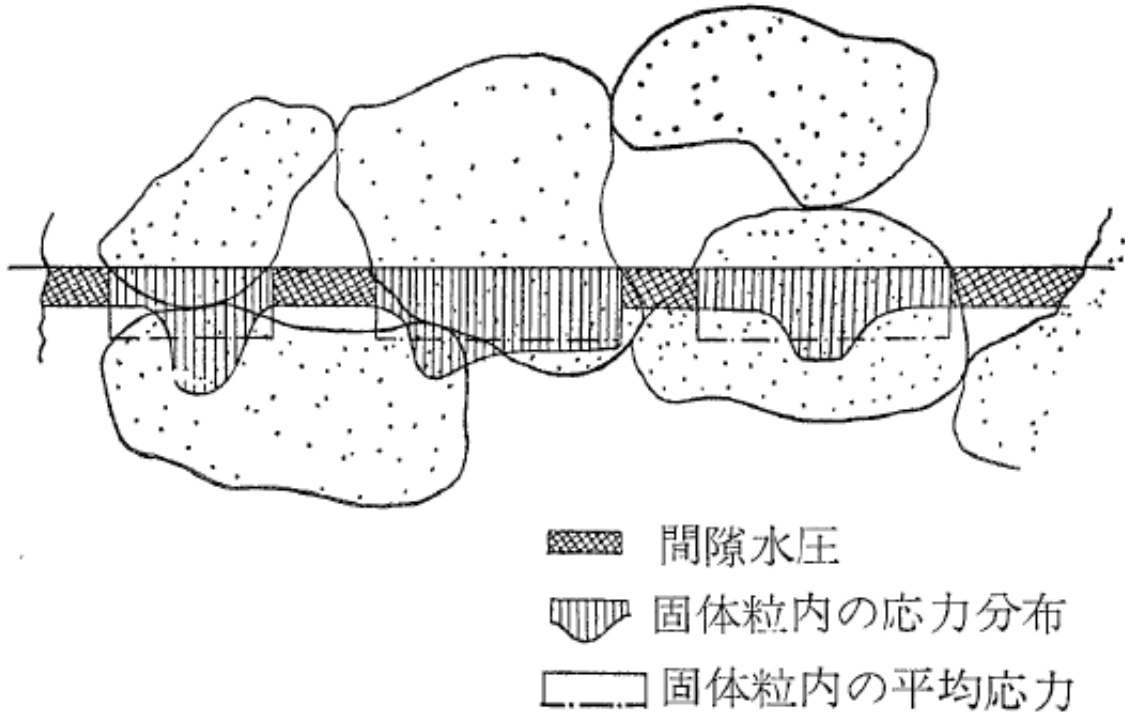


1-3 図 デンバーの廃水井孔底での水圧と月別地震数 (M1.5以上)との関係 (Healyら、1968)

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、枯渇しかけた油田に水を圧入して、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。

M. K. Hubbertら (M. K. Hubbert, 1972 収録の M. K. Hubbert and Willis, 1957 および M. K. Hubbert and Ruby, 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。1-4 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概念図で、粒子と粒子の間 は水で充たされている。



1-4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)。

このような岩石が圧縮されると、固い固体粒子内部はあまり変形せずに、まず固体粒子同士の位置関係が変わり、結局間隙空間の大きさが縮められる。ところが内部の水の圧力は間隙を拡張しようとするので、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1-4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

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

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かのように(見かけ上)なる。 $f_b \approx 1$ とすれば1-1 式 は次のように省略できる。

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

1-2 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

$$\sigma_e = S - p \quad \dots (1-4)$$

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。ここで全応力の中で p に相当する応力は強度に関係しない成分なので中立応力 neutral stress と呼ぶことがある。

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。

$$\tau = \tau_0 + S \tan \Phi \quad \dots (1-4)$$

ここでは τ_0 は $S=0$ の時の剪断強度で 粘着力と呼ばれる。 Φ は摩擦角に対比して内部摩擦角と呼び、多くの岩石で $\Phi=30^\circ$ 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(1-4) 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。

$$\tau = \tau_0 + \sigma_e \tan \Phi = \tau_0 + (S-p) \tan \Phi \quad \dots (1-5)$$

つまり全垂直応力 S が大きくなっても、間隙圧力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Heally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判っている。1-3 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、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(1-3 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よそ最大応力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47.9-26.9=21MPaであったが47.9-38.9=9MPa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(1-3)で $\Phi=30^\circ$ とすれば、粘着力はおおよそ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)が米国で行われたことがある(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が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ちつつある

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 $f_b \approx 1$ と言えるのであろうか？ Hubbertらはこの難点を避け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1-4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1-4図の応力のピークをむしろ問題にすべきである。1-2式で f_b が1に近くなり、 σ が計算上きわめて大きくなることも、 σ を応力集中のピークの値と考えた方が理解しやすい。結局TerzaghiやHubbertの説明では不十分なのである。応力集中によれば硬岩でも有効応力説が成り立つことを説明できる。そのためにはハイドロフラクチュアリングとはどのような現象かをもっと理解する必要がある。(つづく)

参考文献

Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T., and Raleigh, C.B. (1968): The Denver Earthquakes, *Science*, **161**, 1301 — 1310

Hollister, J.C. and Weimer, R.J. eds. (1968): Geophysical and geological studies of the relationships between the Denver earthquakes and the Rocky Mountain arsenal well, *Quarterly of the Colorado School of Mines*, **63**, 1- 251

Hubbert, M.K. (1972): *Structural Geology*, Hafner, New York, 329p

小出 仁 : (1976) : 地下の応力を測る。地質ニュース 257号14-22

U. S. G. S. (1973) : Man-made earthquakes at Denver and Rangely, Colorado, *Earthquake Information Bull.*, 5, 4-9