

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

2. マグマフラクチュアリング

小出 仁 (環境地質部)
Hitoshi KOIDE

火山・地震観とマグマフラクチュアリング

ハイドロフラクチュアリング (Hydrofracturing) は水圧破砕あるいは水圧破壊と訳され 地学関係では 流行語のようになりつつある。マグマフラクチュアリング (Magmafracturing) の方は まだあまり使われていない言葉であり メカニズムも十分解明されていない。それはマグマ すなわち液体状態の岩石が存在しうるのは 非常に高温であり 詳細に観察したり 実験することが困難なためである。しかし マグマが岩石を壊して あるいは大地の割れ目を通して 地表に流れ出てくることは 昔から多くの人々が実際に目撃してきたことなので マグマフラクチュアリングの方が ハイドロフラクチュアリングよりむしろ早くから知られていた。

古代文明の発達したギリシアや南イタリア地方には 多くの活火山がある。ギリシアのストラボ (Strabo 紀元前63~後19?) は 地下には火があり 火山はその安全弁であると考え ローマのルクレティウス (Lucretius 紀元前99~55?) は 地下には巨大な空洞があり 空洞内の熱風が周囲の岩を崩すと地震が発生し 地表に火や岩と共に吹き出すのが 噴火であると述べている。

近代地質学の夜明けの時期に 水成説 (Neptunism) と火成説 (Plutonism) の有名な大論争により 地下に溶融状態の岩石—すなわちマグマが存在し 地表に噴出して火山を作ったり 地下で固結して火成岩となることは 広く認められるようになった。イギリスの火山学者スクロップ (G. P. SCROPE 1797-1875) は 水に飽和したマグマが膨張し 地下に割れ目を作って その中に入り込み 岩脈を形成し 割れ目が地表にまで開いていれば火山となると考えた。明白なマグマフラクチュアリングの考えが始めて現われたといえる。

世界有数の火山国である日本でマグマの作用が重要視されたのは当然であった。小川琢治は「地質現象の新解釈」(1929)を著し マグマの地下での活動が 造構造運動や地震の原因であると主張した。この本は現在読んでも示唆に富んでいる。例えば 岩漿 (マグマ) の注入によって地殻下層に急激に割目が出来て地震として

地表に震動が伝わって来る (p.400) という考えは 現在でも通用する。マグマの作用を重視するあまり 断層による地震発生説を否定したのは 明らかに行きすぎであったが マグマフラクチュアリングの地質学的意義を本格的に論じた唯一の本である (いまだにこれに類する成書は書かれていない)。

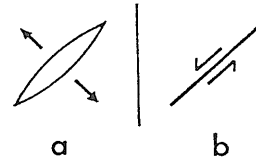
火山がある以上 地下に溶融した岩石すなわちマグマが 多少なりとも存在しかつ地殻の中を移動していることは明らかである。しかし 移動のしかたは様々であろう。一つは受動的な移動機構で 例えば地下の空洞の内部へ流入するとか 褶曲に伴なって 減圧部へ移動する場合である。しかし 能動的にまわりの岩石を押しつけて貫入することも考えられる。また周囲の岩石を溶融させた結果として移動することもある。能動的に周囲の岩石を押しつける場合も 塑性変形や粘性流動により周囲の岩石に割れ目を作らずに移動するケースと周囲の岩石を割って 割れ目内に貫入するケースがある。このような移動機構については昔から様々な考えが出され 議論されてきた。古くは もっぱら受動的なマグマ移動機構や周囲の溶融によるという考えが有力であったらしい。もちろん これらの移動機構が地下のマグマ移動に貢献していることは明らかである。しかし 最近では力学的に能動的なマグマ移動機構の方が重要視されるようになりつつある。

藤原咲平は 1932年に出版された「地渦・地裂及地震」の中で マグマが地下の空洞に流入することが主な移動機構であるという考えに対抗して 次のような明瞭なマグマフラクチュアリングの考えを提案している。「…もし果して此様な空洞が存するとすれば シルやラクリスと同程度の空洞が現存して 矢張り見出されねばなるまい。然るに此所謂侵入岩なるものは沢山あり容易に観察されるものであるが 空洞は火山錐に属する部分又は水蝕の盛な地方のみ見出され 未だ嘗て岩脈の付近に見出されない。是等の点から見て岩漿が岩層間に進入するのはその流体静圧力に圧されて岩層を押し開き押し開き徐々に進むと見るべきものではなからうか。岩層が深処にあり充分に高温であれば岩漿は仲々急には固化せず 其進入を相当に継続し得るであろう。・・・

中略・・・此岩漿穿入作用に伴ふて起る可き地震は石本（巳四雄）氏の主張さる様な衝撃ではなくてむしろ楔形に割り込んで行く際の割れ目の尖端の跳躍的進行であろう。割目を徐々に進行せしむるに際し決して連続的でなく、毎もピチピチと或長さ宛不連続的に伸びて行くのは常に自分等が各種の割れ目の実験で遭遇した所である。此ピチと割れる現象ならば其裂開面が相当に大きければ相当の震波を発生し得るはずである。」(p. 11~12)。

この藤原の説はマグマの貫入による岩脈の形成と火山性地震の発生を定性的にはよく説明しているといえよう。先の小川琢治の説と藤原映平の考えはよく似ているのだが前者がマグマ地震説の日本での元祖と目されるようになったのに対し後者が断層地震説を支持するのは前者がマグマの移動を重視したのに後者が破壊を重視したといういわば観点の違いが原因であった。藤原は自ら破壊の実験を行い割れ目の形成過程を実際に観察しているので地震が破壊により発生することを直観的に理解しやすかったのであろう。

徳田貞一(1931)は受動的なマグマ移動機構を重視ししゅう曲の背斜部に生じる間隙にマグマが移動すると述べている。能動的か受動的かは結局はマグマ圧と周囲の岩体内の応力のどちらが主要な役割を演じているかという問題になるがこれはたいていの場合どちらも重要であるということになる。この問題を理解するにはマグマフラクチュアリングの原理を理解する必要がある。今はこれ以上入らずに後に述べることにしたい。しゅう曲には岩層の永久変形が必要であるから塑性的な変形もマグマ移動の要因になりうることを示している。きわめて遅い変形の場合岩石は流体のような挙動をすることが知られている。特に高温・高圧下では岩石は流動的になる。この場合マグマと岩体をそれぞれ粘性の異なる流体として扱うと数学的解析が可能である。そこでマグマの移動機構の力学的研究は二相の粘性流体の流動としてモデル実験や数値解析によるシミュレーションが盛んに行われている。ただし流動とはいっても粘性が大きいので水の流れのような速いものではなく、あめ細工に近いものである。したがって速いマグマの移動は粘性流体モデルでは説明できない。また花崗岩質岩は地殻上部では非常にぜい性的であるので極度に遅い変形以外は粘性流体として近似できない。



第2-1図 a. 引張り割れ目
b. 剪断割れ目

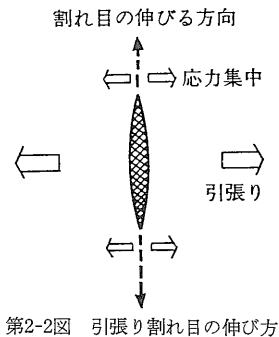
マグマのクサビ

小川琢治や藤原映平が述べているように、マグマが岩石を押し割って貫入したために板状の岩脈が形成されるとすれば、流体がどのようにして硬い岩石を割るのが問題になる。岩脈のうちには既存の古い断層や割れ目に沿って入りこんだと推定されるものもある。しかし、その場合でも地下の岩盤には周囲から圧力が加わっているので古い割れ目は閉じているから閉じた割れ目を押し開かなければマグマは貫入できない。

スコットランドの岩脈を研究したアンダーソン(E. M. ANDERSON)はマグマの貫入機構について明確な考えを示した。アンダーソンによれば大部分の岩脈は引張り割れ目(Tension fracture)であり、剪断割れ目である断層とは割れ目のタイプがまったく異なる。ただしアンダーソンも断層に沿ってあとから岩脈が入ることがあることは認めているがこれはあくまでも例外としている。図2-1に示すように引張り割れ目は割れ目面に垂直な方向に両側の盤が離れるように移動するので離れた後に空間が生じる。この空間をマグマが満すと岩脈になる。ところが剪断割れ目の方は割れ目面に沿って両側の岩盤が移動するので空間はできない(図2-1)。したがってマグマは入り込めないはずである。

しかし、実はこれは理想的な場合に成り立つ話であって実際にはアンダーソンの言うほど割り切ることにはできない。純粋な引張り割れ目と剪断割れ目だけが存在するわけではない。実際には中間の性格を持った割れ目もある。岩脈は純粋な引張り割れ目であるとい切ることにはできないわけである。しかし傾向として岩脈を胚胎する割れ目は引張り割れ目の性格が強いということではできるようである。

引張り割れ目は例えば図2-2のように引張った方向に垂直に生じる割れ目である。ところが地下では通常は岩石はあらゆる方向から圧されている状態にあるので引張られる状態になることは考えにくい。しかし岩脈の多くが引張り性の割れ目であるとすると全体と



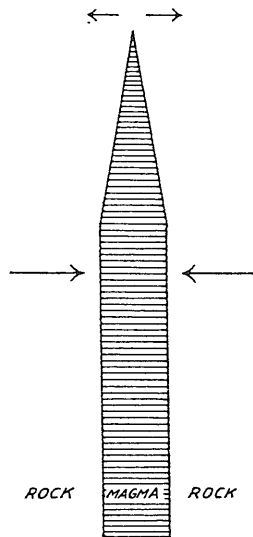
第2-2図 引張り割れ目の伸び方

しては圧縮されているような状態の中で 引張り割れ目の生じるような特別のカラクリを考える必要がある。局部的に引張りの発生するようなカラクリは 実は様々考えられるが アンダーソンや藤原咲平が 岩脈形成のカラクリとして考えたのはクサビ効果である (図2-3)。クサビは通常は硬い材料で作られ 先端の断面は三角形に尖っている。予め狭い溝状のノッチを作っておけばこれにクサビをあてがって打込むことにより 硬い材料でも簡単に割ることができる。貫入する物質がマグマのような流体の場合 通常の硬いクサビとは状況異なっているが 根本原理は同じである。

図2-3のような割れ目をマグマが満たしている時 まわりの岩圧の方がマグマ圧より大きければ マグマはしぼり出されて割れ目が閉じてしまうので 岩脈として残らなくなる。しかし マグマ圧の方が岩圧よりわずかも大きいと 割れ目の側壁をマグマが押し 割れ目の幅が広がられる。図の上方のまだ割れていない部分は直接には広げられないが 下方がマグマ圧によって側方に広がるため それにひきずられる。特に 割れ目の先端は局部的に強く引張られる。すなわち 割れ目の先端付近は ごく狭い範囲ではあるが 強い引張りの場が生じるので ここで引張り割れ目ができる。その結果として 図2-3のようなマグマで満たされた割れ目は マグマ圧が岩圧よりある程度以上大きい間は 割れ目はどんどん拡大して行く。これが流体クサビ効果の原理である。図2-2のような通常の引張り割れ目の場合も 割れ目の伸びる先端の応力状態は 流体クサビの場合とほとんど同じである (実は少し違うのだがほとんど同じとみてさしつかえない)。したがって流体クサビによって生じた割れ目も 通常の引張り割れ目と見かけ上同じである。

広域的には圧縮場の中で クサビ効果等による局部的引張りによって生じた割れ目を伸張割れ目 (Extension fracture) と呼び 通常の引張り割れ目と区別すること

1984年2月号



第2-3図 マグマのクサビ式貫入 (伸張割れ目) (Anderson 1942)

がある。地表の突出部分等を除けば 地下では狭義の引張り割れ目が生じることはほとんどない。したがって 伸張割れ目と呼ぶべきであるが 習慣上たいてい引張り割れ目と呼ばれている。

水やガスの場合も 圧力が岩圧より高ければ 同様な流体クサビ効果がある。マグマフラクチャリングやハイドロフラクチャリングの最も基本的なメカニズムが流体クサビ効果である。これによって硬い岩盤に流体が貫入し 破壊することが理解できる。クサビ効果以外の効果も ハイドロフラクチャリングに寄与する。このような他の効果については後に説明する。またクサビ効果についても もっと定量的に調べる必要がある。この効果を詳細に解明すれば 地熱開発や噴火の予知に役立つであろう。また地震や熱水性鉱床の研究にも重要である (つづく)。

参考文献

Anderson, E. M. 1942; The Dynamics of Faulting. Oliver and Boyd, London, 206p.
 小川琢治 1929; 地質現象の新解釈 古今書院 745p.
 小川琢治・笹倉正夫 1933; 地質学史 岩波講座 110p.
 藤原咲平 1932; 地渦・地裂及地震 古今書院 161p.
 小林英夫・岡邦雄 1954; 地学史 中教出版 467p.
 小出 仁 1978; ハイドロフラクチャリングとマグマフラクチャリング 1. デンバー地震 地質ニュース 290号 p. 26-29.
 徳田貞一 1931; 弧状列島 岩波講座 37p.