

深部における割れ目とマグマの発生との関連性について

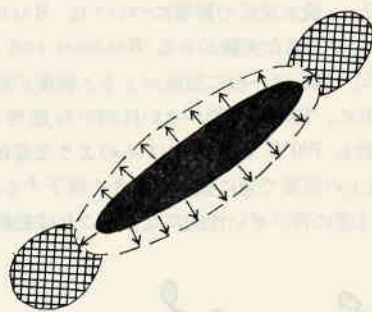
小 出 仁*

生田 (1973) によって指摘された火山の線状配列と断裂との関係は、造構造運動の解明のために本質的に重要であると思う。私は力学的立場から火成活動と地下深部における割れ目の発生について日頃考えていることを述べてみたい。現在、火山の線状配列のうちの一部はホット・スポットの考えで説明されている。しかし、ホット・スポットで線状配列をすべて説明することはできない。例えば、箱根火山・湯河原火山・多賀火山・宇佐美火山もほぼ直線上にならび、北ほど若くなっている (久野, 1952) が、プレートの運動の向きとは調和しない。また、生田によって指摘されたようなエシェロン状の配列もホット・スポットでは説明しにくい。アフリカの大地溝帯でも、地溝帯と火山の配列は明らかに関係がある。このような火山の線状配列は地下深部の割れ目を反映していると考えられる。

火成活動の盛んな場所と造構造運動のはげしい所および地震の頻発する所とは大きく見ればほぼ一致している。こまかく見れば火山列の直下でかえって一般の場所より地震が少ないところもあるが、これはそこが極度に破碎されていて大きな地震がおこらないか、あるいは破碎帯のために地震波が吸収されることで説明できる。マクロに一致することは、三者の間に何らかの関連があると考えてよいであろう。

マグマの発生機構としては温度の上昇によるものと、圧力の低下によるものが考えられる。地下深部では温度の上昇も圧力の低下も、通常はきわめてゆるやかに長時間かかって行われると考えられる。このようなゆるやかな現象が割れ目の発生や地震のような急激な現象と結びつくためには、引き金になる何らかの機構が必要である。この引き金になる現象は広い意味での相変化であろう。広い意味での相変化というのは、固体同志の単なる結晶構造の変化だけの相転移や化学反応を伴う分解等の変化、また融解や脱水反応等、急激な体積の変化や弾性係数の変化を伴う現象すべてを指している。岩体の一部で体積が急に膨張したり、収縮したりすると、その付近で圧力が急に増大したり低下するような部分ができる。圧力変化の大きさやそのおよぶ範囲は、体積変化の大きさや体積変化をする部分の形や大きさ、岩体の

弾性係数等いろいろなファクターによって異なる (小出, 1972)。しかし、体積変化の大きさと体積変化をおこした部分の形がもっとも大きく影響する。扁平な円盤状の部分が急に膨張する場合に円盤の先端部で大きな応力集中が生じるために、もっとも大きい圧力の解放が期待される (第1図)。扁平な円盤状の部分が急に 10% 程度体



第1図 部分的な体積膨張のために生ずる圧力解放。網目部で厚力が解放される。

積膨張をしたとすれば、円盤の先端付近では約 100 kb 以上の局部的引張り応力が働く。地下では岩圧が作用しているので、岩圧の大きさを克服する分だけ引張り応力は小さくなる。しかし、地下 100 km での岩圧を考えても、局部的には約 70 kb 以上の絶対的引張り応力が作用することになる。岩石は地下深部の高温高压下では、長期にわたる応力下では粘性流体のように流動する。しかし、相変化による膨張のような急激な変化による短期の応力に対しては弾性的な挙動をすと思われる。したがって、高い引張力が急に作用すれば、割れ目が発生するだろう。引張応力下で発生する割れ目は、ぜい性的な引張り割れ目であるから、規模の大小はともかくとして、割れ目の発生の際に地震を伴うであろう。割れ目の付近では、圧力はほとんどゼロに近いのであるから、もし岩体の温度が常圧での融点を越えていれば融解がおきる。いわゆる低速度層では、このような融解がおこりうる温度条件下にある。温度が融解がおこるほど高くない場合には揮発性成分が割れ目内に集積して来るであろう。

岩石の融解の際には 10% 程度の体積膨張がある。ま

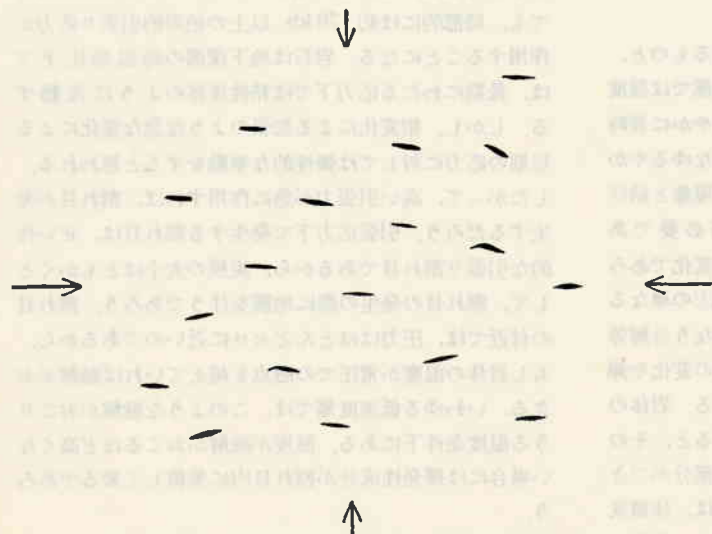
* 東京支部・工業技術院地質調査所

た固体の相転移の際にも数%の体積変化がある。たとえば、 $MgSiO_4$ スピネルからかんらん石への相転移は11%程度の体積膨張がある(AKIMOTO and FUJISAWA, 1967)。しかし、さらに重要な引き金は脱水反応ではないかと思われる。角閃石や雲母等の含水鉱物はかなりの深さまで安定に存在しうるので、含水鉱物の中の水は地下深くまで到達しうる。この水が脱水反応により放出されると、全体としては体積膨張をおこす。脱水反応の場合はさらに間隙圧の増加という効果がある。もし、岩体中でもっとも圧力の低い部分より大きな間隙圧が生じれば、引張り割れ目と同様なぜい性的割れ目が発生する。すなわち、有効応力の法則が成立することは、実験的に確かめられている。脱水反応の影響については RALEIGH と PATERSON の有名な実験がある(RALEIGH and PATERSON, 1965)。岩石は一般に温度が上ると強度が除々に低下すると共に、破壊の挙動がぜい性的から延性的になる。蛇紋岩も700°C程度まではそのような変化をするが、それ以上の温度で急に強度が大きく低下すると共に、破壊挙動は逆に再びぜい性的になる。これは蛇紋石の脱



第2図

厚力解放の3様式左側は押し拡げられるために厚力が解放される。右側2者は剪断のために厚力が解放される。



第3図

初期の孤立したマグマを含んだ割れ目

水反応により、間隙圧が急に増大したためである。

体積膨張だけではなく、剛性率の急な低下によっても圧力の急速な低下が部分的に起る可能性がある。岩体中に剛性率が特に小さい円盤状の弱面が存在しているとき、そこに剪断力が作用すると、円盤の先端付近に高い引張り応力の集中部が生じて、そこから割れ目が発生する(KOIDE, 1972)。したがって、ある程度の偏差応力すなわち剪断応力が加えられている時に、剛性率の急な低下がおこれば、そこから割れ目が生じる。あるいはまた融解する。剛性率は相変化の時に急に低下する可能性がある(第2図)。

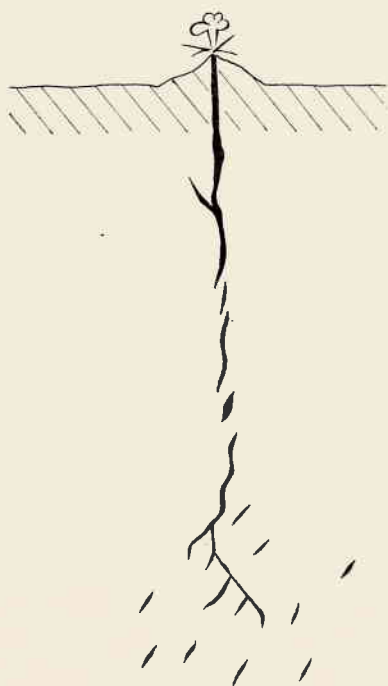
以上のような過程で地下深部で割れ目が生じ、また岩石が部分的に融解しても、それが相変化した部分のごく近辺だけに限られていれば、岩石中にごく小さなマグマのかたまりが散在しているだけで、それらの多くはまた固化してしまうだろう。温度が比較的低温、偏差応力が小さければ、割れ目が大きく発達したり、マグマが集まって上昇するようなことは起らないだろう。しかし、偏差応力が十分に大きいと、岩石中のマグマや揮発成分を含む割れ目あるいは割れ目がとくに多く集まったゾーンは、剛性率のきわめて小さい弱面として作用するので、その周辺に大きな圧力低下部を生じる。したがって、マグマのたまりである割れ目はどんどん拡がって行く。

地下深部での割れ目とマグマの発生は、案外、ずっと低い圧力・温度条件下で観察される岩石中のぜい性的な割れ目の発達の機構(KOIDE, 1971)と似ているのではないかと思われる。すなわち、ぜい性的な微小な引張り割れ目が、応力集中源になる弱面から発生する。この弱面は多くは粒界や先在割れ目である。さらに偏差応力が大きくなると、微小な引張り割れ目の数がふえ、エシェロン状に割れ目がならんだ割れ目帯ができる。この割れ目がさらに発達して大きい断層へと成長して行く。

地下深部では、温度と圧力が大きくなると岩石は延性的になり、ぜい性的な割れ目の役割は通常小さくなる。しかし、マグマや揮発性成分たとえば熱水などが存在すれば、割れ目内の流体圧が高くなり、岩石はふたたびぜい性的な破壊をするようになる。

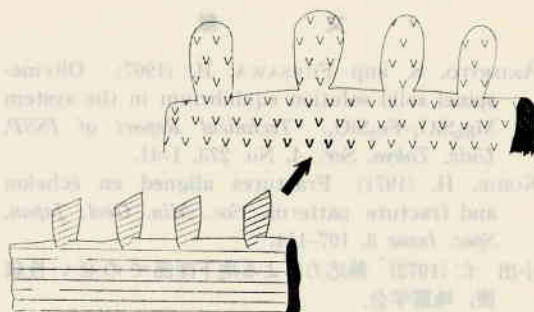
地下深部で、温度の上昇・圧力の低下・偏差応力の増加がおきると、この変化がゆるやかであっても、ある臨界

条件を越えると、まず岩石のごく一部で相変化がおきる。すると相変化した部分を核としてさらに割れ目が出て、融解や揮発性成分の集積がおきる(第3図)。もし、偏差応力が高くなると、流体を含んだ割れ目がさらに多くなる。この割れ目は多くは粒界などの弱面に沿って生じ、最小圧縮力の方向に直角な平面内に伸びた円盤あるいはだ円盤状のものが多くであろう。割れ目は偏差応力の増加と共に数がふえて、エシェロン状に並んだ割れ目群による割れ目帯ができる。割れ目帯が大きく発達して、内部が連結されると、さらに大きいマグマや熱水を含む割れ目になる。大きい割れ目になると、割れ目の最下部と最上部はある程度の高差をもつ。地下深部ではまわりの岩石よりマグマの方が比重が軽いので、割れ目の上部は下部より有効圧力が小さくなる。したがって、割れ目は上部に発達しやすくなる。このようにして、マグマや熱水を含む割れ目は地下深部から上方に発達して行く(第4図)。



第4図 マグマを含んだ割れ目の上昇

マグマを含む割れ目が浅所に到達すると、有効圧力はどんどん小さくなり、ついにはマグマの圧力の方がまわりの岩石よりも大きくなる場合もある。また、マグマの温度が低下して、粘性が大きくなると、せまい割れ目内



第5図 岩株の線状配列

に浸透しにくくなる。このようになるとマグマは割れ目内に入りこむより、衝き上げの効果が大きくなって、キュボラ状の衝き上げにより貫入するようになる。すなわち、地下深部の割れ目の上にキュボラ状にマグマだまりが並ぶ(第5図)。これが火山や火成岩体の線状配列として地表で観察される。

熱水などの揮発性成分は低温でも粘性が小さいので、マグマより細い割れ目内へ浸透しやすい。したがって、熱水はマグマの圧力より低い圧力で、細い割れ目内に浸透し、地熱地帯や鉱床を作る。

マグマは割れ目内で必ずしも浅所から地下深部まで連続しているとは限らない。マグマがしぼり出されると割れ目の一部は閉じる。また、温度が下がると一部が固結する。しかし、マグマが再び下部から供給されて、圧力が上ると割れ目が再び開いて、断続的な火成活動が続くであろう。マグマの供給がまったくとまると、火成活動はとまるが、断層はなお弱面として残り、断層運動がつづくが、最後はまったく固結してしまうだろう。

以上の経過を要約すれば、火成活動の歴史は次のようにまとめられる。まず、マグマを含む割れ目が孤立して存在する幼年期があり、割れ目が集まって割れ目帯になり上方へ伸びて行く少年期となり、マグマが地表近くへ達して、地表で火成活動のきざしが見え、地震も大きなものが発生する青年期があり、つづいて火成活動や断層運動や地震活動が活発におきる壮年期になる。最後は火成活動がおとろえて断層のクリープ運動のみが見られる老年期となる。

この地下深部の割れ目と火成活動のモデルは、まったくスペキュレーションの産物であって、実証はされていない。しかし、この作業仮説によって、力学的理論や実験と実際の地質現象との結びつけが、よりもっともらしく出来るのではないかと考えている。

文 献

AKIMOTO, S. and FUJISAWA, H. (1967) Olivine-spinel solid solution equilibrium in the system $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$. *Technical Report of ISSP, Univ. Tokyo, Ser. A*, No. 273, 1-41.

KOIDE, H. (1971) Fractures aligned en échelon and fracture patterns. *Soc. Min. Geol. Japan, Spec. Issue* 3, 107-114.

小出 仁 (1972) 熱応力による地下深部でのぜい性破壊, 地震学会.

KOIDE, H. (1972) Fracture initiation in brittle polycrystalline material such as rocks. *Mechanical Behavior of Materials*, Vol. 4, 455-463.

久野 久 (1952) 7万5千分の1地質図幅・同説明書, 熱海, 地質調査所.

生出慶司 (1973) 断裂と火山の線状配列, 地団研総会資料.

RALEIGH, C. B. and PATERSON, M. S. (1965) Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. *Jour. Geophys. Res.* Vol. 70, 3965.

Fractures and their Relation to the Generation of Magma in the Depth

by

Hitoshi KOIDE

(Abstract)

Volume change as a result of phase transition in the depth gives rise to the fractures, around which stress drop produces magma. The rapid lowering of elastic constant may cause the same results.

Under the increase of differential stresses the fractures grow up into their zone through which magma accumulates and rises toward the surface of the earth. These processes will be discussed in detail.

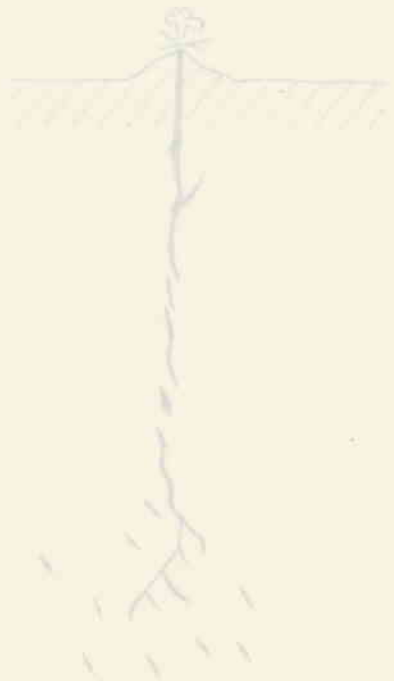


図1 地下深部の断層とマグマの生成

この図は、地下深部での断層の形成とマグマの生成との関係を示している。地表から地下深部へと伸びる断層が、マグマの生成と上昇を促進する役割を果たしている。断層の形成は、地下深部での相転移による体積変化や弾性定数の急激な低下によって引き起こされる。断層が成長し、マグマが蓄積し、地表へと上昇する過程が示されている。