

大地をつくるもの 12 マグマの作り方 1

地球内部の温度と岩石の融ける温度

マグマは地球内部の岩石が融けることによってつくられます。地球内部は地表に比べ高温・高圧の状態になっています。図1を見てください。赤い線が地球内部に行くほど温度が上昇することを示すグラフ（地温勾配曲線）です。では、なぜ地球内部ほど高温なのでしょう？ それには大きく2つのことが原因と考えられています。一つは地球が形成されたときに起きた多くの隕石の衝突（後期重爆撃期*）によって地球はかなりの部分が融け、内部にはその時の熱の名残があるからです。現在も地球は地表からどんどん冷えていっています。火山活動や地震活動などはその代表的な現象です。もう一つは、地球を構成する岩石中の放射性同位体が放射線を出しながら崩壊するときに出す熱です。

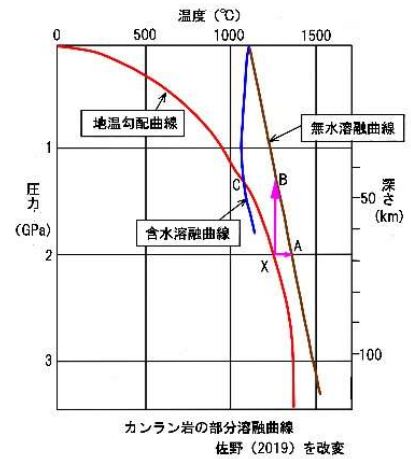


図1 岩石の融ける温度と圧力

茶色い線は実験で求められた岩石（マントルをつくっているカンラン岩）の融ける温度（無水熔融曲線）です。圧力が高いほど溶けにくくなるため、地球内部ほど岩石が融けるための温度は高くなっています。地球内部の温度がこの線の右側であれば岩石は融けますが、左側の範囲では融けることができません。この図からわかることは、地球内部の温度（地温勾配曲線）は岩石が融ける温度よりも低く、普通では溶けないということです。

では、どのような条件が満たされれば岩石は融けるのでしょうか？ まず、融けるとは、固体結晶（鉱物）をつくる原子の結合が切れることです。温度が上昇すれば、鉱物をつくる原子の振動が激しくなり分離しようとしませんが（熱膨張する）、圧力が高いと、離れようとする原子の動きが抑え込まれます。そのため結合が切れるには、より高温になって原子が強く振動する必要があります。そのため岩石が融けるためには、何らかの理由で高温になるか、圧力が減ることが条件になります。例えば図の X の地点にある岩石は、温度が A 点まで上昇すると融けます。または、圧力が B 点まで減少すれば融けます。さらに岩石が融けるための条件に、岩石が水分を含んでいれば溶けやすくなるということが見つかったのです。その条件を示すグラフが青線で示された含水熔融曲線です。C点で地温勾配曲線と含水熔融曲線が交わっています。水を含んでいる場合はC点の温度で融けることになりそれは地球内部の温度で融けることを意味します。図1では深さ100km くらいまでしか書かれていませんが、地温勾配曲線と無水熔融曲線はだいたい 100 数十 km~200km くらいの深さでは接近しており、この付近で何らかの原因で部分的に温度が上がったり、あるいは圧力が下がったりすると、マントルの温度は岩石が融け始める温度を超えて岩石が融け始めることになります。

以上のことから圧力減少や水分付加が起きるところでマグマが形成されやすくなります。プレートテクトニクスを考えによれば、圧力減少が起りやすいところは、マントル物質（岩石）が上昇する所、つまり中央海嶺やホットスポットです。また、水分付加が起りやすいところは沈み込み帯のところでは。

※後期重爆撃期：41 億年~38 億年前の期間に隕石や小惑星の衝突が高頻度で起きたといわれます。月にはこうした衝突の

痕跡が残されていますが、地球では、痕跡は見られません。後期重爆撃期の存在に否定的な考えもあります。

マグマの生産量は中央海嶺が一番多く（62%）、沈み込み帯で 26%、ホットスポットで 12%ほどのよう

す。中央海嶺は長く（総延長6万km）、海嶺の軸の下には幅が約5kmのマグマ溜まりが存在するためマグマの生成量は大きいのです。

地球内部にある岩石の融けたものをマグマと呼びますが、細かく言うと鉱物が漂っている状態と完全に融けた状態（液体のみの状態）があります。前者をマグマ、後者をメルトと呼ぶことがあります。岩石はいろいろな鉱物の集合体であり、その鉱物によって融点が変わります。岩石は一部が融け始める温度と、全部が融け終わる温度との間に数百℃程度の幅があり、その幅の間の温度では固体と液体が同時に存在します。融け始めの温度付近では固体（鉱物）の割合が多く、融け終わる温度付近では液体（メルト）の割合が多くなっています。通常、マグマ溜まりの多くは鉱物の量が多くて「マッシュ」と呼ばれる粥状となっているようです。下からマグマ溜まりに融けたメルトがどんどん供給されないと、周囲からの冷却によってマグマの固化が進みマッシュが多くなります。

地球内部の構造

ここで地球内部の構造について少し紹介します。地球内部は、物質や組成の違いに基づいて地殻、マントル、核に区分されます。それに対して流動性（固いか軟らかいか）に注目すると、地球表層部は、数10km～100kmの厚さを持つリソスフェア（プレート）と、その下の比較的軟らかく（低粘性）、動きやすい（流動性が高い）アセノスフェアとに区分されます。区分の仕方によって境界の深さが異なるため少し複雑です。大陸地殻

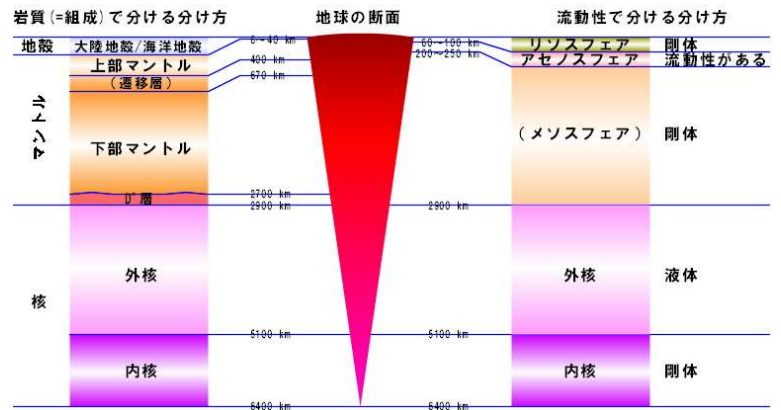


図2 地球の内部構造 産総研 HP 2023/1/14 閲覧

の上部は主に花こう岩質の岩石から、大陸地殻下部と海洋地殻は主に玄武岩質の岩石からできており、その厚さは陸では厚く、海では薄いと考えられています。上部マントルは主にかんらん岩からできていると考えられています。下部マントルはかんらん岩がより緻密な構造に変わっている（ペロブスカイト相）と考えられ、下部マントルと外核の境界部はD''層*と呼ばれる、更に緻密な構造（ポストペロブスカイト相）に変わっていると考えられます。

アセノスフェアは上部マントルに相当し、その一部が溶けていて流動性があると考えられています。プレートは、ほぼリソスフェアに相当します。

※D''層(ディー・ダブル・プライム層):コア(外殻)と接するマントルの最下部の厚さ約200kmの領域(深さ2700~2900km)です(図2)。地震学者のBullenが地震波速度分布をもとに、地殻、上部マントル、遷移層、下部マントル、外殻、遷移層、内核を順にA層から名づけた名残です。下部マントルがD層です。D'層は知られていません。

圧力減少の起きるところ

中央海嶺やホットスポット

中央海嶺はプレートが裂けて引き離されていくところで、プレート境界になっています。沈み込むプレートの動きで隙間ができ、その隙間を埋めるように下から物質(高温のマントル物質)がわき上がってきます。高温のマントル物質がわき上がってくるから隙間ができるわけではありません。隙間を埋めるマントルは

上昇によって圧力が減るため断熱膨張して少し温度が下がります (0.6°C/km で低下)。一方、かんらん岩の融点は4°C/km 下がるため、深さが50km よりも浅くなると溶け始めます (減圧溶融)。通常の中央海嶺のマントルの温度は1300°C くらいで、溶け始めから溶け終わるまでは数百°C の温度差があるため部分溶融します。融け始めると融解エネルギーを使うためマントルの温度低下は大きくなりますが、上昇するほど溶融温度も下がるため部分溶融は続きます。上昇による部分溶融

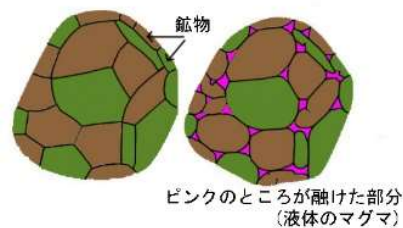


図3 岩石の融け方

によって形成されるメルト (融けた部分) が2~3%を超えると隣同士のメルトがつながり始め (図3)、早く上昇し始めます。プレート下部のマントルはメルトが抜け出たあとの溶け残りマントルですので、溶ける前のマントルに比べて硬く (粘性率が高く) になります。上昇してきたマントル物質は表層に近づくにつれて部分的に溶融して玄武岩質マグマをつくります。このマグマは、海嶺の軸部の海底に噴出しますが、海水で急冷されるため、枕状構造をもつ玄武岩 (枕状溶岩) やその碎屑物 (水中火砕堆積物) となります。上昇中に途中で止まってしまった場合は、海底付近に岩脈 (岩石はドレイイト, dolerite) として貫入します。海嶺では隙間が拡大する力が働いているため、マグマの通り道 (火道) が並行に次々に形成され、並列した岩脈になります。中央海嶺下でマグマが海底まで上昇できるのは、周囲が密度の高い (重い) 玄武岩のため浮力が得られるためです。中央海嶺の軸の下にあるマグマ溜まりで、早期に晶出する結晶が沈殿し層状のカンラン岩ができ、マグマがゆっくりと固まると斑レイ岩ができます。

このように海嶺の中軸部で下からマントル物質 (高温ですがマグマではありません) が上昇するとき、温度は急に下がらないが圧力だけが下がることになりマグマが発生すると考えられています。現在の地球の温度では、アセノスフェアの融解がはじまる深さはおよそ10km なので、中央海嶺のマグマ溜まりの深さは約10km, それが固化した海洋地殻の厚みも約10km です。

ホットスポットは、マントルの上昇流によってマグマが生成され、プレートの動きとは孤立した地点で火成活動 (火山など) が生じている場所のことをいいます。ホットスポットは通常のマントルより高温でハワイでは1500°C と見積もられています。ここでもマントル物質の上昇によ

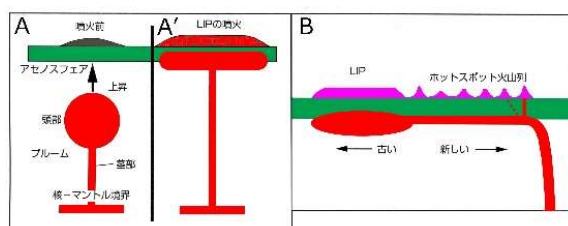


図4 プルーム (ホットスポット) (佐野, 2015)

って圧力の減少が起き、マグマが発生 (減圧融解) します。どこから上昇してくるかは不明で、下部マントル (670km 以深) から上昇してきているだろうと考えられています。もっと深いD”層からだという考えもあります。ブルームテクトニクスの考えでは、キノコを縦割りしたときのように頭部と茎部からなるブルームの頭部がプレートの下に達すると、短期間 (数百万年) で大量のマグマがつくられます (図4)。大量のマグマは厚い大陸地殻も引き裂き噴火して、LIP*を形成します。その後、茎部が数千万年~1億年以上かけて継続的にマグマを噴出させてホットスポットをつくるといわれます。

※LIP: 巨大火成岩岩石区 Large igneous provinces

非常に広い範囲に渡り火成岩が分布している地域およびそれを生成した火山活動のことをいいます。数百万年程度の比較的短期に大規模な火山活動をおこしたもので、岩石の体積は数100万km³にも達します。大陸では洪水玄武岩による台地 (デカン・トラップなど)、海底においては巨大な海台 (オントンジャワ海台など) がつくられます。岩石は主に玄武岩で、成因としてはマントル・ブルームが考えられています。