

水・岩石相互作用から見た地殻内流体の性質や存在状態

藤本光一郎 (地質調査所)

Water/rock interactions and characteristics of crustal fluids

K.Fujimoto (Geological Survey of Japan)

1. はじめに

流体の存在は岩石の力学的性質や物理化学的性質に大きく影響を与えるため、火成活動や地震活動をはじめ地殻の変動における流体の役割について近年注目が高まっている¹⁻⁴⁾。しかし、地下深部の流体を直接採取したり観察したりすることは困難であり、まだ未解明な点も多い。本報告では水を主体とする地殻内の流体について、その化学的な性質や温度・圧力条件での変化、流体相の存在状態やその安定性などについて述べる。

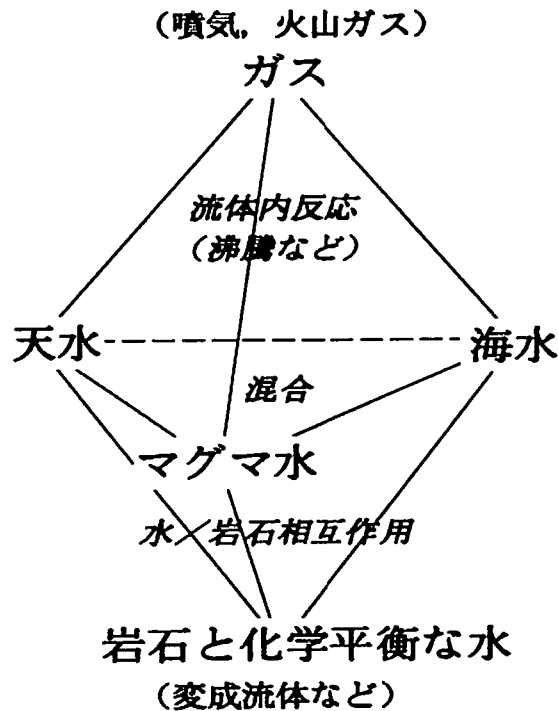
2. 地殻内の流体の多様性とその変化過程

地殻内に存在する流体は、水を主体に溶存する金属元素や塩素などの塩類、二酸化炭素やメタン、窒素などの非反応性ガスなどから構成される。ここでは主にその組成の多様性の生じるメカニズムについて簡単に述べる。

地殻内の流体は基本的には海水、天水（雨水）、マグマ水（マグマが固結する際に放出する水）の三種類の水が起源と考えられる。海水や天水はおよそ組成としては決まっており、全世界的にはほぼ同じ組成と考えればよいが、マグマ水は発生するマグマの性質でいろいろ変化すると考えられる。しかし、実際にマグマ水を採取することは困難なために、その組成は実験やマグマ水の影響があると考えられている火山ガス、地熱水、流体包有物などから間接的に推定するほかはないのが現状である。

それらの起源を持つ流体が地殻内で混合したり、岩石と反応を起こしたり、後で述べる沸騰のような流体内部反応を起こしたりして、その組成を変化させ様々な地殻内の流体を形成する。その関係を第1図の6面体に模式的に示した。混合は三種の端成分流体で作る水平な三角形内での組成変化で示され、岩石との反応は下側の頂点である岩石との化学平衡状態への変化過程である。一方、沸騰を起こすと、上側の頂点である火山ガスや憤気（へんき）の方向への変化過程となる。地殻内の流体の解明は、流体の起源とその変化の過程を解明することにほかならない。

混合については、岩石側の透水性や混じり合う流体の密度や粘性の違いによる混合のしやすさなどの物理的な側面と、化学組成の異なる流体の混合による化学的变化（例えば還元的な地下水に酸化的な天水が混じることによる鉄の酸化物の沈殿）などを考慮する必要がある。



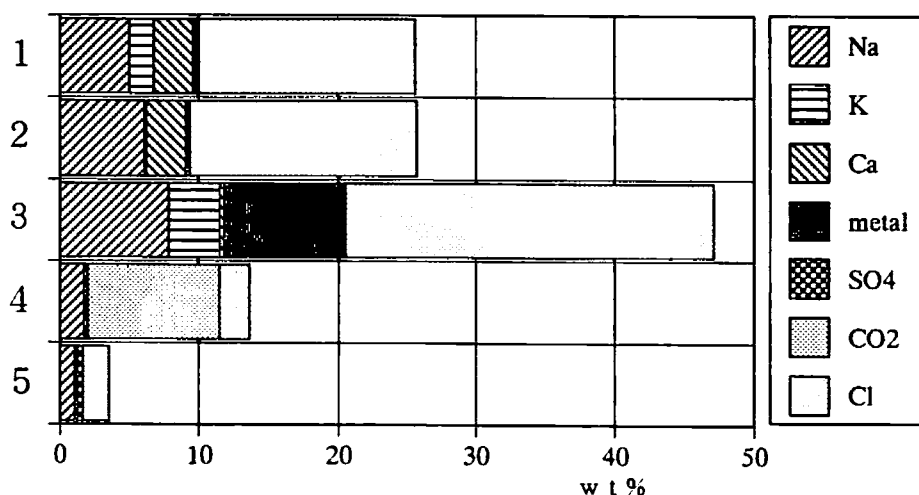
第1図 地殻内流体の多様性を生じさせる諸過程

岩石との反応は通常岩石の立場からはおよそ温度の低い方から風化作用 (weathering), 続成作用 (diagenesis), 熱水変質作用 (hydrothermal alteration), 変成作用 (metamorphism) などと呼ばれる。風化作用は主として地下で形成した岩石が地表の環境で含水物質に変化する過程であり, 続成作用は堆積物が主に埋没の過程で脱水反応などを起こして固結した堆積岩になる過程, 熱水変質作用は火山活動や火成活動にともなう熱水循環によって岩石が石英, 粘土鉱物や沸石などの含水鉱物, 炭酸塩鉱物, 硫化鉱物などに変化していく過程である。この三者を合わせて変質作用と呼ぶこともある。変成作用は沈み込みや衝突などに伴って岩石のおかれる温度圧力条件が変化することに伴う鉱物の変化過程をいうが, これにも水や二酸化炭素は重要な役割を果たしている。いずれも流体と岩石が反応して新たな化学平衡状態に近づこうとする過程である。それぞれの特徴を非常に単純化して第1表にまとめた。実際には, それらが重複したり, はっきり分類できないケースも多い。

以上のような起源流体の違いや多様性の生じる個々のプロセスを復元するためには安定同位体や微量成分などのトレーサーを用いるのが有効である。地下水や温泉水, 火山ガスや憤気など地表付近で採取される流体については膨大なデータがあり, 詳しい報告もあるので⁵⁾, ここではデータの比較的少ない数キロ以深に存在すると考えられる地殻内流体の主要成分の組成例を第2図に示す⁶⁾。いずれも深い井戸や流体包有物から得られたデータであり, 基本的にはNaClを主体とする水である。炭酸塩岩中を通過した水は炭酸塩に富むようになる。参考に海水を載せたが, 海水よりも塩濃度が高い場合も多い。これは, 後に述べるように火成活動に伴って高温で流体の相分離によって生じる場合と, 地表での海水の蒸発による濃縮が関与する場合などが考えられる。

	変成作用	熱水変質作用	続成作用	風化作用
深度	数～数十km	地表～数km	地表～数km	地表
温度	100～1000℃	<約500℃	<200℃	<数十℃
熱構造	伝導型	対流型	伝導型	なし
水	海水・天水・マグマ水	海水・天水・マグマ水	海水・天水	天水
空間的広がり	>数km	<数km	広い堆積盆	水平的広がり
反応の特徴	固体反応—脱水反応	加水反応	脱水反応	加水反応
水／岩石比	小さい	大きい	比較的小	大きい

第1表 表層～地殻内部における水・岩石反応の特徴



第2図 地殻内流体の主要成分の組成（文献6のコンパイル）。
metalはFe, Mn, Cu, Zn, Pbを合計した値。1；SaltonSea地熱地域の300℃の地熱水。2；ミシシッピー油田の143℃の塩水。3；花崗岩起源の濃厚塩水。4；二酸化炭素に富む鉱液。5；海水。1，2は深井戸で採取された水，3，4は石英中の流体包有物の組成データ。

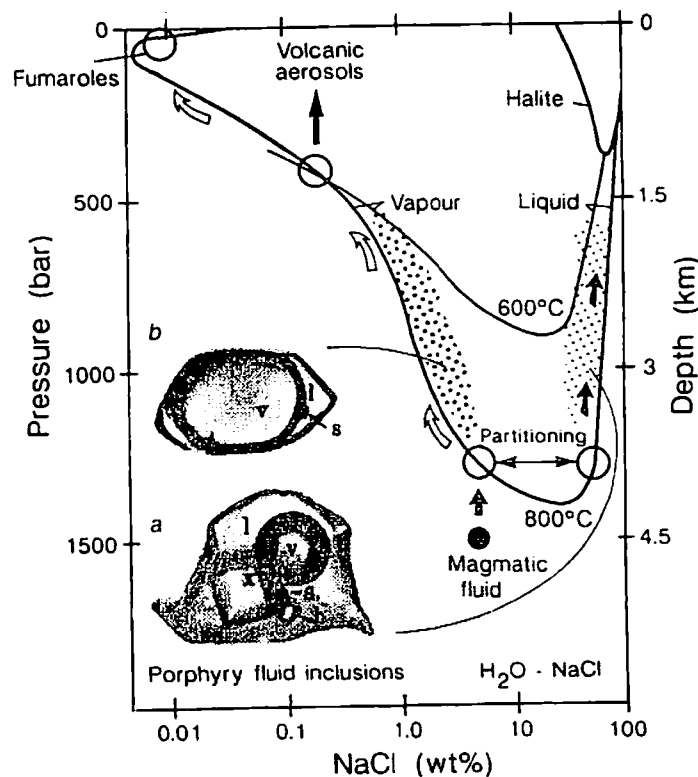
3. 流体の相分離

先に述べたように流体の相分離は、流体の多様性を作るうえで重要である。ここでは気液二層分離（沸騰）について簡単に説明する。よく知られているように1気圧では純水は100℃で沸騰するが、圧力を上げていくと相分離する温度も上昇し、最終的に、221.19bar, 374.15℃まで到達する。それ以上の温度圧力では、気相液相の区別の無い超臨界状態となる。

一方、純水ではなく塩類が溶け込むと2相分離を起こす条件も変化し、同じ圧力ならばより高温で沸騰を起こすようになる。また、塩類を溶かし込んだ水については、石英など

の溶解度の増加など岩石との反応性も高まる。また、塩濃度は水の電気的性質にも大きく影響するので、地殻の電気的性質の解明の際には重要な要因になると思われる。

ここで代表的な溶存塩であるNaClを例にして高温高压条件における二相分離を考えてみよう。この過程は、熱水成の鉱床を作る鉱液をマグマから発生させる基本的過程である⁷⁾。第3図は横軸に塩濃度、縦軸に逆方向の圧力を示す。元々のマグマには数%の水が通常含まれている。水は長石や石英、輝石など主要な造岩鉱物には主成分としては含まれないためにマグマから鉱物が晶出するにつれ、残されたマグマ中の水の濃度は上昇する。マグマは最大10%近くまで水を溶解させうるが、それをこすと独立した相としての水が放出される。その水には、数%程度の塩素など様々な陰イオン元素やインコンパチブル元素とよばれる鉱物の陽イオンサイトにはいりにくいK, Rb, Sr, 希土類元素などが濃集する。このような水は周囲のマグマや結晶に比べて軽いので浮力を受けて上昇する。その結果圧力が減少して2相領域にはいると、塩濃度が数十%にも達する濃厚な塩溶液と希薄な蒸気相が生じる。その際、濃厚塩水の方にさらに金属元素が濃集し、それが金属鉱床を作る鉱液となる。第1表の3の濃厚塩水はそうようにできたと考えられる。濃厚塩水は冷却したり上昇して圧力が減ると食塩の結晶を晶出する。濃厚塩水の化石とも言える流体包有物中にしばしば食塩などの結晶があるのはそのためである。一方、蒸気相はガスに富む流体包有物として記録されるほか、火山ガスや噴気になって地殻から抜けていく。



第3図 花崗岩質のマグマから高塩濃度の流体が相分離により生成する機構。(文献7による)

4. 水の地殻内での存在状態

それでは、水はどのような形で地殻内に存在するのであろうか？多くは自由水として岩石中の割れ目や孔隙などを満たす形で存在すると考えられる。岩石の孔隙率は深いほど圧密の影響で急速に減少し、例えば日本の地熱坑井のデータでは地表付近では数十%のオーダーの孔隙率が2キロを超えると1%前後に減少する⁸⁾。また、ドイツで掘削された超深度坑井においても坑底付近の9 km深でも静水圧条件の水が存在することが流体包有物の解析から推定されている⁹⁾。一方、自由水がどの程度深部まで存在しうるかについては、Nur and Walder¹⁰⁾が、深井戸のデータや地震波、電気伝導度、変成岩や鉱床などの地質状況などに基づいて10-20キロの範囲まで定常的ではないが存在しうることを述べている。

このような自由水は周囲の岩石より密度が小さいので、基本的には浮力を受けて上昇するが、岩石と反応を起こしやすい高温条件の場合や、透水係数が小さくて移動が難しいような場合は、岩石中に取り残された流体包有物や次に述べる鉱物中の水のような岩石中に束縛された水に転化する場合もある。自由水として動き回るか岩石中に束縛されるかは、様々な要因が効いてくるので単純ではないが、水を含む鉱物の分解や岩石自体の破碎などで束縛された水が自由水に変わる場合もある。束縛された水は、流体包有物のような明瞭に水として存在するものを除くと以下のような形で鉱物中に存在する。

吸着水：文字どおり鉱物の表面に吸着している水。基本的には、ドライでない限り、鉱物表面には必ず1分子程度の水で覆われている。非常に薄いために量的には粘土鉱物のような細粒で表面積の大きい鉱物を除くと%以下である。吸着水の量は水蒸気圧などによって変動する。

構造水：表面でなく、鉱物の結晶構造中に取り込まれている水。ただし結晶のサイトに配位した水ではない。例としては沸石中の水で、構造を破壊せずに水をとることができる。重量として鉱物の10%オーダーを占めることができる。

配位水：これも結晶構造中に取り込まれた水であるが、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)中の水のように、数が決まっており、水をとると構造が破壊される。構造水と同じく10%のオーダーで存在しうる。

以上は、水の形で存在するものであり、一部の沸石や粘土鉱物を除いて通常2~300℃以下で脱水する。

水酸基(OH)：粘土鉱物・雲母・角閃石などの含水鉱物中の水酸基。鉱物により差があるが、比較的高温まで安定である。近年、角閃石や雲母などの含水鉱物がマントル中の高温高压条件でも安定であることがわかり、沈み込むスラブからの脱水や、それに引き起こされる火成活動などの実態が次第に明らかになりつつある。これについては、巽¹¹⁾に詳しい。

これ以外に、量的にはppmオーダーと考えられるが、鉱物中の欠陥や不純物などに水が存在することが明らかになっている。実際、マントル起源のオリビンのように無水と考えられる鉱物からもわずかな水が赤外吸収などの方法によって検出されていることから¹²⁾、

マントル中はかなり水が存在するという可能性も指摘されている。ただ、濃度的にはわずかもwater weakeningなどを起こすには充分と言われている。これ以外、メルト中にも前にのべたように10%程度の水が溶け込むことができる。近年の高温高圧実験の進展により、非常に水を溶かし込む特殊なメルトも見つかってきている¹³⁾。

さらに水分子や水酸基のような直接水と関連するものの他に、反応によって水を発生するポテンシャルを有するものとして、炭化水素や水素も無視できないが、ここではその存在を指摘するにとどめる。

5. 活地熱地帯における流体の存在の推定

活地熱地帯は、地下の状況が様々な手法で調査されており、また活発な熱水流動も存在することから、水の役割を解明するうえに大きな役割を果たす。特に日本有数の地熱地帯である岩手県葛根田地域においては、最高温度500℃以上と推定される貫入直後の花崗岩から非常に高塩濃度の重金属を溶かし込んでいる流体が採取されている¹⁴⁾。より深く高温の部分のアナログとして、貴重な情報を与えると思われる。

6. まとめ

以上、地殻内の流体の性質や存在状態を述べてきた。水は自由水としてだけでなく、鉱物中の水などその時々、地質環境や物理化学的条件で様々な形を変えながら地殻内を移動する。その本格的な研究はまだはじまったばかりであり、幅広い分野の研究者の協力が求められている。この報告がそのために役立てば何よりも幸いである。最後に日頃から議論いただいている地質調査所地殻熱部の佐々木宗建氏、シンポジウムで話す機会を与えてくださった高知大学の村上英記博士に心から感謝する。

文献

- 1)Fyfe, W.S., Price, N.J. and Thompson, A.B., 1978, Fluids in the earth's crust, Elsevier, Amsterdam, pp.383. (出版当時は非常に鮮鋭な問題意識と幅広い内容で話題になった。もう古典になったが、いまだにこの分野では最もまとまった教科書。)
- 2)Shmulovich, K.I., Yardley, B.W.D. and Gonchar, G.G., 1995, Fluids in the crust - Equilibrium and transport properties, Chapman & Hall, London, pp.323. (ロシアの研究者中心のレビュー集。溶液の熱力学、物理化学的研究の最近の動向を知るにはよい)
- 3)Jamveit, B. and Yardley, B.W.D., 1997, Fluid flow and transport in rocks. Chapman & Hall, London, pp.319. (1995年のオスロでのシンポジウムの講演集。ヨーロッパの研究者が多く、タイトル通り輸送特性や岩石の物性に関係する論文が多い。)
- 4)Geophysics Study Committee, 1990, The role of fluids in crustal processes, National Academy Press, Washington DC, pp.170. (アメリカの第一線の研究者が、マグマ溜まりから堆積盆地まで幅広い地質条件や分野の11のレビューを書いている。)

- 5)鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田稔編, 1985, 地熱流体の化学, 東京大学出版会, pp.215.
- 6)Yardley, B.W.D. and Shmulovich, K.I., 1995, An introduction to crustal fluids. (p.1-12 in Ref. 2)
- 7)Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B., 1995, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- 8)矢野雄策, 須田芳郎, 玉生志郎, 1989, 日本の地熱調査における坑井データ, その1 コア測定データ. 地調報告, 271, pp.832.
- 9)Grawinkel, A. and Stockhert, B., 1997, Hydrostatic pore fluid pressure to 9 km depth - fluid inclusion evidence from the KTB deep drill hole. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 3273-3276.
- 10)Nur, A. and Walder, J., 1990, Time-dependent hydraulics of the earth's crust. (p.113-127 in Ref. 4)
- 11)巽好幸, 1995, 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会, pp.186.
- 12)Aines, R.D. and Rossman, G.R., 1984, Water in minerals? A peak in the infrared. *J. Geophys. Res.*, 89, 4059-4071.
- 13)藤井敏嗣, 三部賢治, 安田敦, 1997, 超高压下の水: 第二のマグマ. 火山42, 特別号 マグマ学, S321-S326.
- 14)Kasai, K., Sakagawa, Y., and Miyazaki, S., 1996, Supersaline brine obtained from Quaternary Kakkonda granite by the NEDO's deep geothermal well WD1a in Kakkonda geothermal field, Japan. *Geothermal Resource Council Trans.*, 20, 623-629.