

過剰アルゴンの獲得過程 - 二種の鉱物の相互作用

兵藤 博信

岡山理科大学自然科学研究所
〒700-0005 岡山市北区理大町1-1

2019年12月15日受理

はじめに

貫入岩体の周囲で起こる過剰アルゴンについて鉱物から放出されるアルゴンによって分圧上昇が時間変化をすることを報告した(兵藤, 2018). 今回は閉止温度(T_c)の異なる二種の鉱物が放出するアルゴンによる分圧上昇が過剰アルゴンにどの様に寄与するかについて考察する.

拡散モデル

以前のモデル(兵藤, 2018)では閉止温度の低い鉱物から放出されるアルゴンがそれよりも高い T_c の鉱物に対して周りのアルゴン分圧をどの様に上昇させるかということであった. ここでは頻りに過剰アルゴンが報告される黒雲母を例にとって具体的に二種の鉱物(長石と黒雲母)の拡散系の貫入岩脈から放出される熱に対してのふるまいを見ていく.

等方的な拡散系(球対称)のアルゴン保持力の低い鉱物(長石)とアルゴン保持力のやや高い円柱対称の拡散系鉱物(黒雲母)を構成鉱物に持つ母岩を仮定した. たとえば花崗岩では, 長石類が黒雲母より圧倒的に多い. 黒雲母は主にc面に沿って拡散が起きると考えられその解析には円筒座標系が用いられる. 長石の拡散については様々な議論があって単純なモデルで表せない(McDougall and Harrison, 1999)単純化のためここでは低い T_c を与える等方的な拡散系を仮定した.

二種の鉱物の脱ガスの割合をそれぞれ f_1, f_2 とするとこれらは解析解がすでにあって有限差分法により短い時間 Δt だけ加わった影響は式(1), (2)のように与えられる. ここでべき乗中の時間積分は時刻 t_i までのすべての履歴を足し合わせることを示している(兵藤, 2018).

$$f_1(t_i) = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \pi^2 \frac{D_{01}}{r^2} \int_0^{t_i} \exp \left(-\frac{E_1}{RT(t)} \right) dt \right] \quad (1)$$

$$f_2(t_i) = 1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2} \exp \left[-\alpha_n^2 \frac{D_{02}}{r^2} \int_0^{t_i} \exp \left(-\frac{E_2}{RT(t)} \right) dt \right] \quad (2)$$

(1)式は球対称, (2)式は軸対称(円筒座標系)である(Crank, 1975). D_0 は周波数因子, r は拡散半径, E は活性化エネルギー, R は気体定数, T は絶対温度である. (2)式の α_n は0次の第一種Bessel関数の n 番目の解 $J_0(\alpha_n)=0$ である. 収束を十分満たす項までの和をとり計算を行った. 時間に対する温度変化 $T(t)$ は兵藤(2018)のモデルと同じものを用いた. また球を仮定した拡散系(仮想的長石)では拡散特性パラメーターとして活性化エネルギー 39 kcal/mol, 拡散半径 $a=0.01$ cm²/sec, 円筒座標系(黒雲母)では47.1 kcal/mol, $a=0.075$ cm²/secを用いた(McDougall and Harrison, 1999). これらの値はDodson(1973)の T_c のそれぞれ288°C, 383°C(冷却速度0.01°C/yr)に相当する.

結果と考察

(1), (2)式から有限差分法を用いて短い時間 Δt に放出されたアルゴンが周囲の分圧に寄与する影響を考える. 貫入岩体に近い距離では上昇する温度の影響を受けて鉱物からは急激に脱ガスがおきる. この時, 岩体の周りにわずかな流体が存在すれば強い温度勾配の影響を受けて非常に強い上昇流が生じ, 脱ガスされたアルゴンが近傍に滞留しないで運び去られる. したがって母岩にはアルゴンは残留せず, 鉱物が再び冷却する際に獲得される過剰アルゴンの原因とはならないため通常は貫入岩の接触域では年代がリセットされる($f=1$). ちなみに広域変成作用では温度は貫入岩とは異なりほぼ同じ温度が達成されるので脱ガスが起きるときは一斉に脱ガスされるが一方で強い温度勾配が存在しないため流体の移動もあまり起きない. したがって広域変成岩の場合過剰アルゴンになるか否かはその後の上昇冷却速度とアルゴン分圧の低下速度(流体等によるアルゴンの移動速度に比例)で決まる.

貫入岩との接触面から離れていくと最高到達温度が T_c を下回るため完全なりセットを受けず部分的リセット状態となる($f<1$). それぞれの鉱物の特性によって完全リセットの領域の広がり異なる(図1a, 1b). 図1aからは T_c の低い球状の拡散系の方が $f=1$ になる領

域が円筒座標系 (図1b) に比べて広がることが見て取れる。部分リセットが起きる領域では温度勾配も接触面に比べてはるかに小さくなるためそれに比例する上昇流の強度は急速に弱まる。つまりアルゴン分圧は時刻 t_i 以前の履歴を引きずることになり以下に示す履歴を伴わない単純なモデルよりも増加化傾向にあると考えられる。

二種の拡散特性の異なる鉱物が存在する時のそれぞれ

れのアルゴン分圧の上昇は、ある時点でのアルゴン分圧はそれ以前に放出されたアルゴンがどれだけ効率よく運び去られたかに依存する。仮にそれ以前の履歴を残さずに領域から一掃される (脱ガスされたアルゴンが滞留しない) と Δt での増加分は

$$P_{Ar} \propto \Delta f_i = f(t_i) - f(t_{i-1}) \quad (3)$$

で与えられる。これは厳密に言えば f_i の導関数である

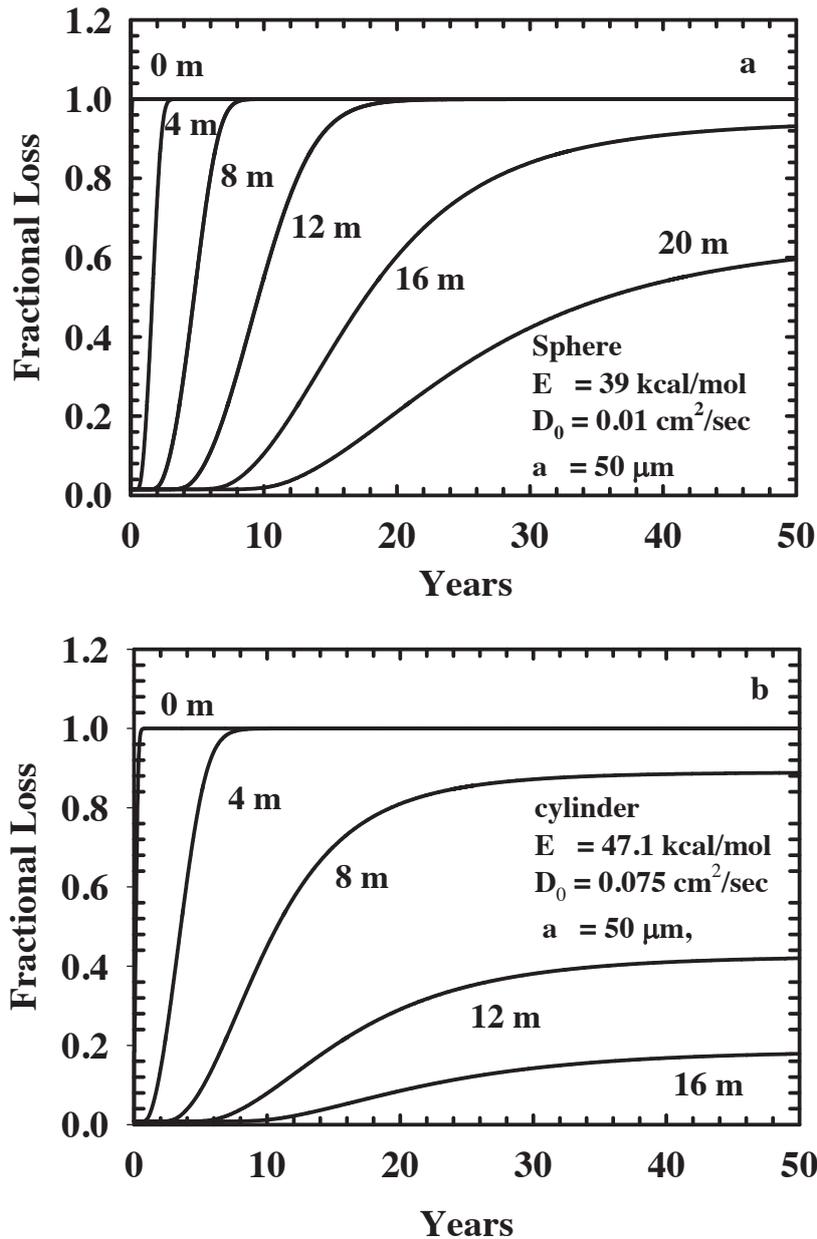


Figure 1a, 1b Fractional Loss f vs time of a mineral system with sphere (1a) and cylinder (1b) geometry in the host rock after a dyke intrusion. The diffusion parameters used are shown in the figures. The mineral in figure 1a has lower closure temperature than on in figure 1b, being illustrated that the area of total release ($f=1$) is broader in figure 1a.

岩脈などの垂直に貫入した岩体では壁面に沿って温度勾配に比例した強さの流れが形成される。温度勾配の進行方向と流れの向きが直交しているため接触面から離れた流れの弱い位置では貫入岩体とその母岩の上部領域では仮に時刻 t_i 以前の履歴が更新されたとしても下からの流れにより更新分は補てんされるため蓄積のみ（アルゴン分圧は全放出量 f そのもの）が起きるといことも想定される。このように母岩中のアルゴ

ン分圧がゼロに近くなる条件は流れの強さと閉止温度領域での熱の継続時間によって支配される。

(1), (2) 式を使って (3) 式の値を計算した各地点での変化を時間変化を図2a, 2b同時刻での分圧の空間分布を図3a, 3bに示す。これらの値は短い時間 Δt に熱によって鉱物から脱ガスされたアルゴンの増加量である。いずれも波の形をした時間変化および位置変化を表す。図3a, 3bのグラフが粗いのは空間分解能が低

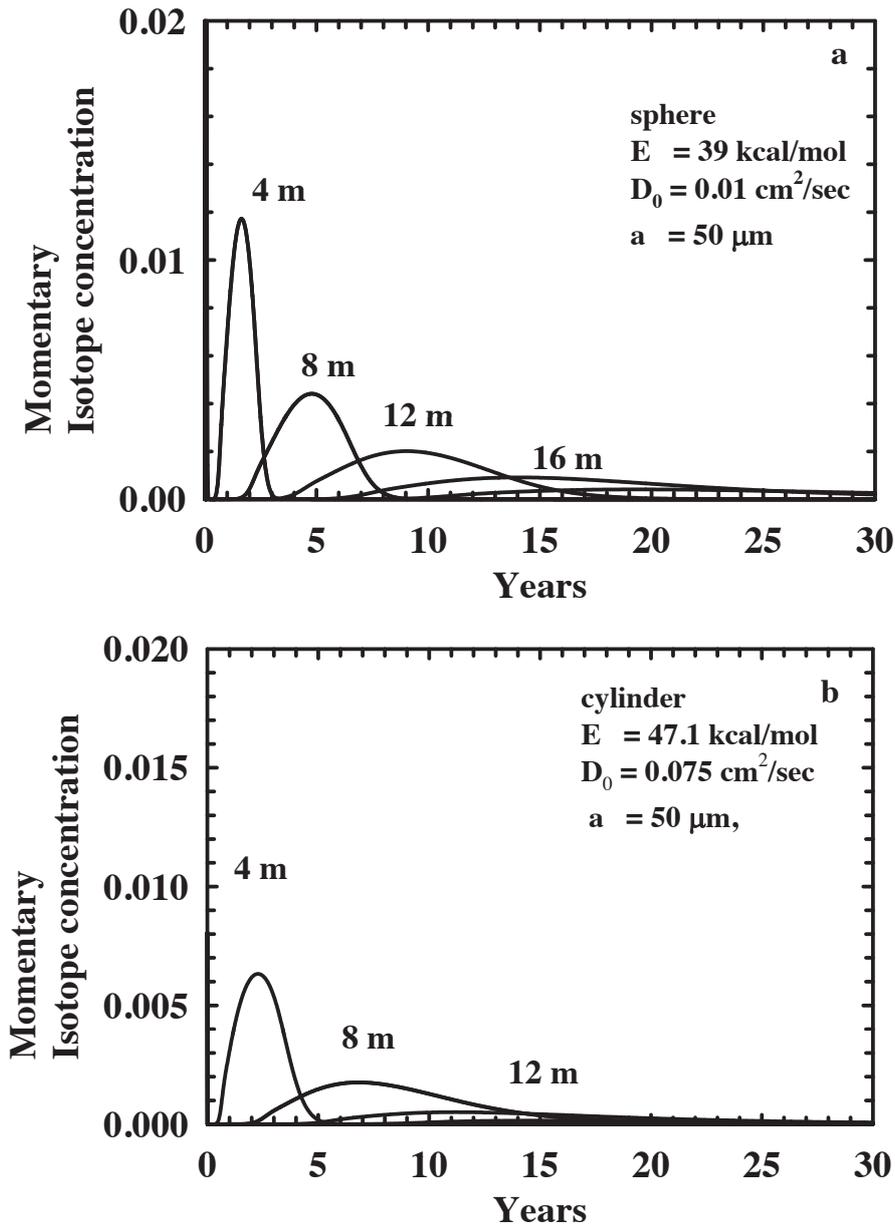


Figure 2a, 2b Momentary argon isotope concentration released from minerals (2a: sphere, 2b: cylinder) during cooling in the host rock, assuming no memory effect from a previous time step. Maxima of the momentary increase is the time derivative of figure 1a and 1b. The wave-like pattern proceeds with time.

い (1 m) ためであるが精度を上げても全体の傾向は変化しない。これらの図は岩脈の冷却に伴う温度変化が流れの強さと拡散係数を制御しながらアルゴン分圧の時間変化を引き起こしていることを示している。接触面付近では放出されたアルゴンは非常に高い温度によってすべて放出される ($f=1$)。これが通常みられるリセットという現象である。貫入で放出される熱により岩脈の近傍では大きな温度勾配 (∞ 流体の移動

速度) によって強い熱対流が励起され脱ガスされたアルゴンは効率よく領域から排出されるためリセット状態は保持される。一方、接触面から少し離れた位置では脱ガスが不十分で拡散係数が部分リセット ($f < 1$) となるだけでなく、対流も接触面近傍に比べ格段に弱くなる。異なる拡散パラメータを持つ長石以外の鉱物は長石それとは異なるタイミングで系の開放、閉止を行うことになる (図3a, 3b)。これらのタイミング

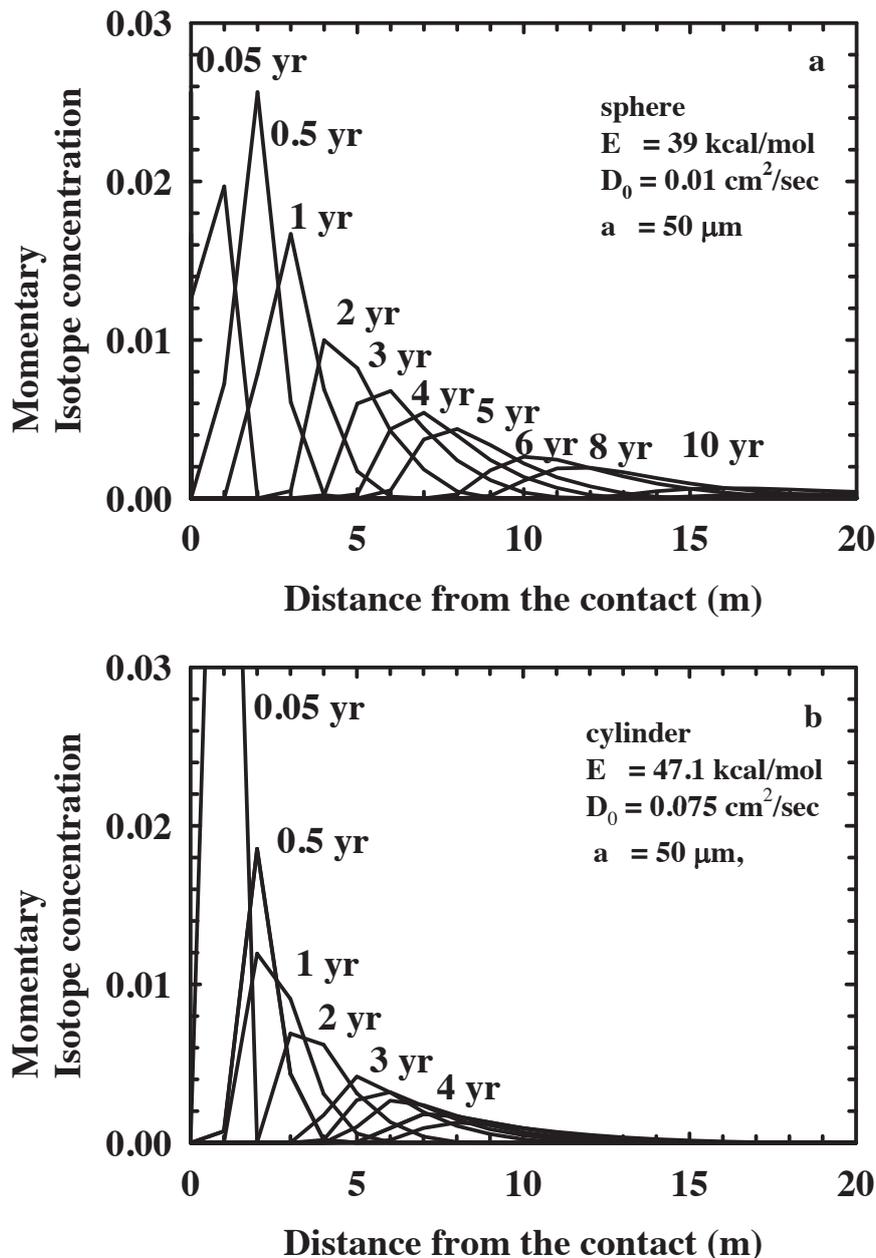


Figure 3a, 3b Momentary argon isotope concentration released from minerals (2a: sphere, 2b: cylinder) as a function of the distance from the contact. Wave-like maxima peaks are formed and propagates as time proceeds. The entrapment of argon occurs when the high T_c system (cylinder) is closing but low T_c system (sphere) is still open.

のずれと温度が高温側の鉱物の T_c を通過して下がる時過剰アルゴンの捕獲が起きる鉱物と起きない鉱物が出来上がると考えられる。即ちアルゴン保持力の小さい鉱物は脱ガスを続ける一方で保持力の強い鉱物は温度の上昇・下降によって拡散が開放系から閉鎖系へとシフトするため温度の下降過程で保持力の弱い鉱物から放出されるアルゴン分圧が高い状態に出会うことによって過剰アルゴンが形成されることになる。

まとめ

二つの閉止温度の異なる鉱物で熱によって放出されるアルゴンの振る舞いを時間的、空間的に図示した。近似としては放出されたアルゴンが履歴を残さず短い時間の間に一掃されることを仮定したが、実際の系ではさらなる分圧の上昇が予想される。閉止温度が高い拡散系が閉じようとする時閉止温度の低い拡散系は脱ガスを続けており、アルゴン分圧を上昇させる方に寄与するため過剰アルゴンが形成されることが予想される。過剰アルゴンの量を決定するのは鉱物外へ出たあとのアルゴンの移動に大きく左右される。このモデル

で見ると岩脈などの近傍ではほとんどの場合過剰アルゴンの形成が予想される。しかし個々の野外条件で様々な因子（鉱物の構成、モード、貫入温度、母岩の流体透過率等）が絡むので具体的数値を入れていく必要がある。この方法は同位体を特定していないのですべての拡散系に同様の議論が適用出来るが、U-Pb系などでは注目する鉱物が1種類であるのと T_c がかなり高いのでK-Ar系とは状況が異なる。

参考文献

- Dodson, M.H. (1973) Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.* **40**, 259-274.
- Crank, J. (1975) *Mathematics of diffusion*. Oxford University Press, 414pp.
- 兵藤博信 (2018) 岡山理科大学自然科学研究所研究報告第43号, 11-13.
- Harrison, T.M. and McDougall, I. (1999) *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method*. 2nd ed. Oxford University Press, 269pp.

Process of Excess Argon Acquisition - Interaction between two minerals

Hironobu HYODO

*Research Institute of Frontier Science and Technology, Okayama University of Science
1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama, 700-0005, Japan*

Acquisition process of excess argon is considered, assuming degassing and trapping of argon is controlled only by diffusion. Acquisition of excess argon is caused by high argon pressure when a diffusion system of a mineral is about to close. Argon release behavior after dyke intrusion is calculated against distance from the contact and time after intrusion. The diagrams illustrate that different timing of opening and closing of the diffusion systems create the excess argon. This model is applicable to not only argon system but also any isotope systems.