

カリ長石のK-Ar年代と閉鎖温度

柴田 賢¹⁾

1. はじめに

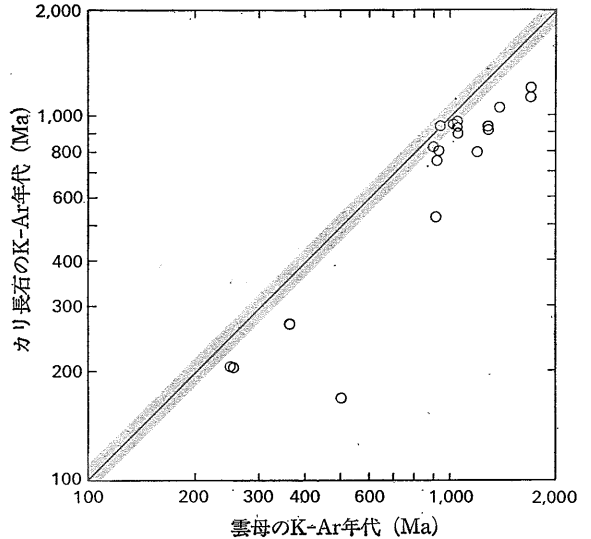
カリ長石は酸性岩の主要な造岩鉱物の1つであり、カリウムの含有量が高いこともあって、K-Ar年代測定が実用化した初期から盛んに用いられた。その後、深成岩や変成岩のカリ長石の年代が、共存する黒雲母の年代より20~30%も若いことがわかり、カリ長石からのアルゴン逸散は常温でも起るという考え方が支配的になった。そこでカリ長石はこれらの岩石の年代測定の対象鉱物としては、あまり使われなくなった。

一方、比較的最近になってカリ長石からのアルゴン逸散のメカニズムが、⁴⁰Ar/³⁹Ar抽出実験等によって明らかにされつつある。また閉鎖温度 (Closure temperature) の概念の導入に伴い、カリ長石は比較的低温 (150~250℃) における熱史を見積るための重要な鉱物として再評価されつつある。小論ではカリ長石のK-Ar年代に関する諸情報を整理して紹介し、特に熱史研究におけるカリ長石の重要性について考察する。

2. カリ長石のアルゴン損失

長石は化学成分によってアルカリ長石と斜長石に大きく分けられる。アルカリ長石はカリ長石 (KAlSi₃O₈) と曹長石 (NaAlSi₃O₈) とを端成分とする固溶体である。カリ長石成分を主とする鉱物には、正長石、マイクロクリン、サニディンがある。ここで問題とするのは正長石とマイクロクリンであり、火山岩に含まれるサニディンは除く。正長石とマイクロクリンは低温型曹長石とある程度固溶体を作るが、その範囲は曹長石成分が約30%までである。端成分としてのカリ長石では、そのK₂O含有量が約14%に達する。正長石とマイクロクリンは共にパーサイト構造を示すことが多く、これがK-Ar年代低下の主原因と考えられた (例えば, Sardarov, 1957)。なお以下では、便宜上カリ長石成分を主とする鉱物 (正長石, マイクロクリン) のことをカリ長石と呼ぶ。

深成岩や変成岩のカリ長石のK-Ar年代が、共存する

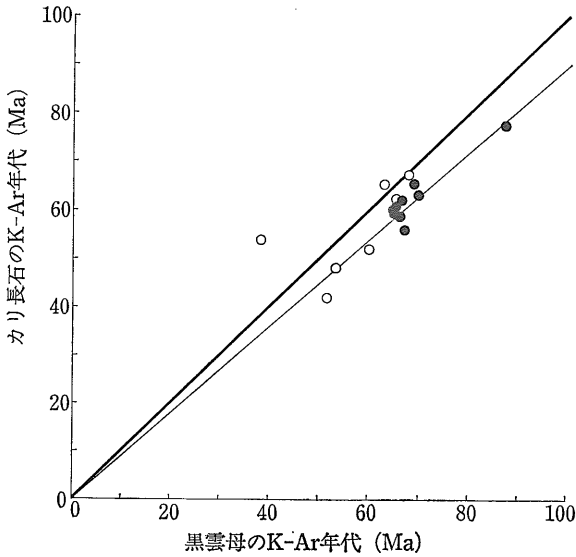


第1図 共存するカリ長石と雲母のK-Ar年代の比較。
(Dalrymple and Lanphere, 1969).

影の部分は年代差が±10%以内。

黒雲母のK-Ar年代より若いことは、1955年に Wetherill et al. によって報告されて以来、数多くの研究がある。第1図は Dalrymple and Lanphere (1969) がまとめたものである。この図は、カリ長石の年代が黒雲母より20~30%若いことを示している。地質調査所では、原子力特研「精密年代測定による断層活動性評価の研究 (1986~89年度)」において、種々の鉱物の年代測定を実施したが、カリ長石もできるだけ測定することに努めた。その結果、領家花崗岩類や苗木・上松花崗岩について黒雲母と対で測定できた試料もかなりの数にのぼった。第2図は両鉱物の年代値を图示したものである。第1図と同様にほとんどのカリ長石は共存する黒雲母より若い年代を示す。ただしこの場合はカリ長石の年代の低下率は5~20%、平均では約10%で Dalrymple and Lanphere (1969) の場合より小さい。なお第2図でカリ長石の年代の方が黒雲母より古いものが2, 3あるが、これらの黒雲母は著しく変質して緑泥石化しているとい

1) 地質調査所 地殻化学部



第2図 白亜紀花崗岩類のカリ長石と黒雲母のK-Ar年代の比較。細線は年代差が10%の線。白丸は黒雲母が著しく変質(K_2O : 3%以下)したもの。データは柴田・高木(1988), 柴田ほか(1988), 柴田ほか(1989), 佐藤ほか(1990), 高木ほか(1989)。

う特徴が指摘される。ただし変質した黒雲母でもカリ長石より古い年代を示すものもある。

このように深成岩のカリ長石のK-Ar年代が黒雲母年代より若いことは、一般的な現象として認められているが、その原因についてはいくつかのケースが指摘されてきた。以下にParsons et al. (1988)の説明に従って原因とされるものをあげる。

a) パーサイト化

パーサイト化に伴うアルゴン損失は、年代低下の原因として最も多く指摘されたことである。Sardarov (1957)はパーサイト化の程度と年代の低下率との間に相関があることを示した。たしかにパーサイトのラメラの境界を通してアルゴンが逃げるといふ考え方は理解しやすい。しかしこの考え方では説明がつかない例もいくつか報告されている。例えば、パーサイト構造を全く示さないカリ長石でも年代低下がみられること、パーサイト・ラメラ間の境界面は一般にくっついている(coherent)こと、さらにパーサイト・ラメラの厚さが厚い方が、より多くのアルゴン損失をこうむっている場合のあること、などである。

b) カリ長石の構造状態

カリ長石における構造的な安定性の低さのことで、転移(dislocation), ステップ双晶(stepped twin)などをさす。

c) 後生的な構造変化

鉱物が生成した時期よりずっと後に、熱水作用等の影響により構造変化を起し、これがアルゴン損失につながる。

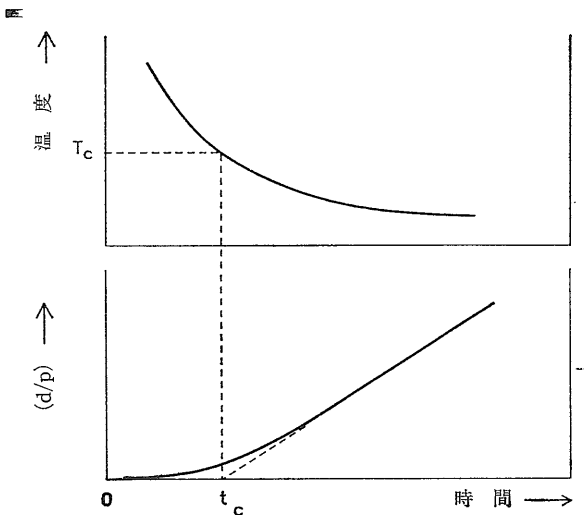
d) 変形

破砕作用をこうむった場合にアルゴン損失が起る。この例として、中央構造線近傍の領家花崗岩類のカリ長石について、著しい年代低下が認められる(柴田ほか, 1988; 高木ほか, 1989)。その原因の一つとして変形の可能性が指摘された。

以上のように、カリ長石のアルゴン損失については、いくつかの原因が考えられるが、どれをとっても、すべてをうまく説明できるということにはなかった。

3. 閉鎖温度

鉱物のK-Ar年代というのは、一般的に鉱物からアルゴン逸散が完全にとまった時期を表すとみなすことができる。地下で高温の岩体がゆっくり冷却する過程において、高温の状態では放射性変態で生じたアルゴンはただちに鉱物から逃げてしまうが、冷却が進むにつれてアルゴンの部分的蓄積が始まり、やがてアルゴンの逸散はなくなり閉鎖系となる。この時期が鉱物のK-Ar年代によって示される訳であり、この時期の温度をその鉱物の閉鎖温度という。この関係を第3図に示した。上図は温度 T と時間 t との関係を示したいわゆる冷却曲線であり、この場合 t は $1/T$ に比例すると仮定する。下図は d/p と t との関係である。ここで d/p は娘核種と親核種の数の比で、K-Ar系では放射起源の ^{40}Ar と ^{40}K をさす。



第3図 閉鎖温度の定義 (Dodson, 1973)。

上図は冷却曲線、下図は年代と d/p との関係、 t_c に対応する温度が閉鎖温度 T_c 。

d/p は年代にほぼ比例するので、下図の直線部分を t 軸にのばした点 t_0 が鉱物の年代を、又その時の温度 T_0 が閉鎖温度と定義できる。

閉鎖温度の理論的な取り扱い は Dodson (1973) によって行われた。一般的に拡散現象は Arrhenius の法則に従い、次の式で表される。

$$D = D_0 e^{-E/RT} \quad (1)$$

ここで D は温度 T (絶対温度) における拡散係数、 D_0 は T が無限大における値 (頻度因子と呼ばれる)、 R はガス定数、 E は活性化エネルギーである。この式から拡散係数は温度依存性が高いことがわかる。

一方、閉鎖温度 T_0 はやはり Dodson (1973) により次のように定義される。

$$T_0 = \frac{E/R}{\ln\left(\frac{ART_0^2 D_0/a^2}{EdT/dt}\right)} \quad (2)$$

ここで A は geometry factor と呼ばれる値で、球形に対しては55、円筒形に対して27、板状に対しては8.7 という値が与えられ、また a はそれらの形状をしたものの大きさ、すなわち球や円筒の半径、板の厚さの半分を表す。(2)式から閉鎖温度 T_0 は冷却速度 (dT/dt) と関係があり、 dT/dt が大きいほど T_0 は大きくなることがわかる。ただし対数の関係から、 dT/dt の変化によって T_0 が大きく変わることはなく、例えば dT/dt が10倍になっても T_0 の変化は数10℃どまりである。

閉鎖温度の見積りは大きくわけて二つの方法でできる。一つは、地質学的方法であり、温度が独立に推定できる場合に鉱物の年代と温度とを対応させる。この方法については、アルプス造山帯の岩石について、変成温度と鉱物年代との関係から雲母の閉鎖温度を求めた例がある (Purdy and Jäger, 1976)。また地熱地帯における掘削井からのデータにより、アパタイトのフィッシュョン・トラック年代に関する閉鎖温度を求めた例 (Naeser and Forbes, 1976) もこれにあたる。

もう一つの方法は反応速度論的方法によるものである。(2)式において、 E と D_0 (又は D_0/a^2) が何らかの方法で求められれば、 T_0 を計算することができる。 E と D_0 は Arrhenius の関係式 (1) により、鉱物を段階的に加熱してアルゴンの逸散する割合から求めることができる。加熱実験の実際例については、次節でカリ長石の例を示す。

このようにして年代測定の方法ごとに、種々の鉱物について閉鎖温度が求められている。第1表は Dodson and McClelland-Brown (1985) によってまとめられたものである。閉鎖温度は冷却速度によって変化するので、第1表では 30℃/Ma の時の値に規準化してある。

第1表 鉱物の閉鎖温度

測定方法, 鉱物	閉鎖温度 (℃)
K-Ar 法	
白雲母	350 ± 50
黒雲母	300 ± 50
カリ長石 (マイクロクリン)	150 ± 30
角閃石	510 ± 25
金雲母	460 ± 50
Rb-Sr 法	
白雲母	500 ± 50
黒雲母	300 ± 50
カリ長石	350 ± 50
フィッシュョン・トラック法	
ジルコン	175 ± 25
アパタイト	120 ± 20
スフェーン	300 ± 40
U-Pb 法	
ジルコン	700 ± 50
モナザイト	530 ± 30
Sm-Nd 法	
ざくろ石	650 ± 100

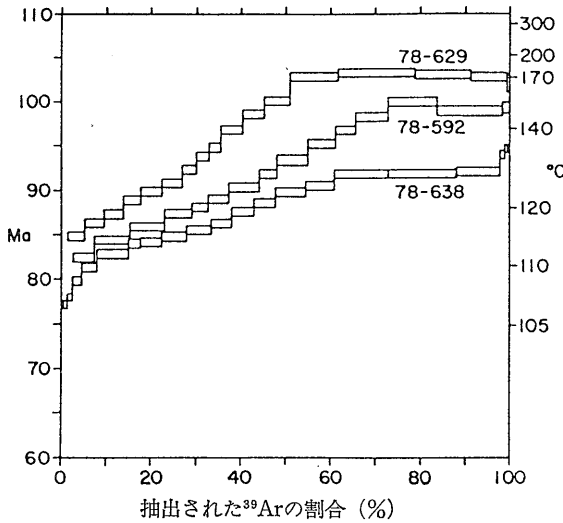
Dodson and McClelland-Brown (1985) による。冷却速度を 30℃/Ma とした時の値。

閉鎖温度は岩体の冷却史を知る上で、重要なデータである。

4. カリ長石の閉鎖温度

第1表ではカリ長石 (マイクロクリン) の閉鎖温度は150 ± 30℃ となっている。この値は Harrison and McDougall (1982) によって $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 段階加熱法による抽出実験によって求められたものである。そこでまずその内容を紹介する。

Harrison and McDougall (1982) はニュージーランド、Separation Point パソリス (貫入年代: 114 Ma) の花崗岩類からのカリ長石 (マイクロクリン) について、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法による年代測定を実施し、第4図のような年代スペクトルを得た。横軸は ^{39}Ar の抽出された割合を示すが、 ^{39}Ar は ^{40}K の中性子放射化によって生じたものである。鉱物中のカリウムに対応するものであり、またステップ状に並ぶそれぞれの段階が抽出温度に対応している。左側の縦軸は各温度段階での見かけの年代値であり、右側にはパソリスの冷却温度が目盛っている。第4図は、年代値が約 80 Ma から始まって直線的に増加し、ガス抽出率が60%程度になるとフラットになって、いわゆるプラトー年代を示している。これはゆっくり (~5℃/Ma) 冷却する岩体のカリ長石について一般的に見られるパターンである。ところで、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法



第4図 カリ長石の年代スペクトル (Harrison and McDougall, 1982).

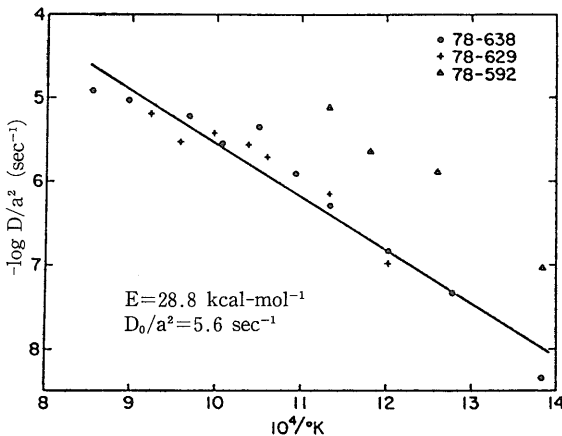
右の縦軸はバソリスの冷却温度。

の利点の1つは、良い試料を用いてよくコントロールされた実験を行えば、年代と合わせて拡散に関するデータが得られることである。すなわち第4図に示されるような段階加熱実験によるデータから、先にのべた D_0 と E を求めることができる。

第5図は Arrhenius プロットと呼ばれるもので、(1)式を変形して

$$-\ln D = E/R \cdot 1/T - \ln D_0 \quad (3)$$

を図に表したものと考えてよい。ただし縦軸は(3)式において a を未知数として D の代わりに D/a^2 をとるのが普通であるので、第5図もそのようになっている。図



第5図 カリ長石の Arrhenius プロット (Harrison and McDougall, 1982).

直線は試料 78-638 と 78-629 の測点を結んだもの。

中のデータ点は3個のカリ長石の段階加熱ごとの ^{39}Ar 損失率を D/a^2 に換算してプロットしたものである。 D/a^2 と ^{39}Ar 損失率 f との関係は、次の式で表される (Harrison and Mc Dougall, 1981).

$$D/a^2 = (1/2\pi^{1/2}f)^2/t \quad 0 \leq f \leq 0.45 \quad (4)$$

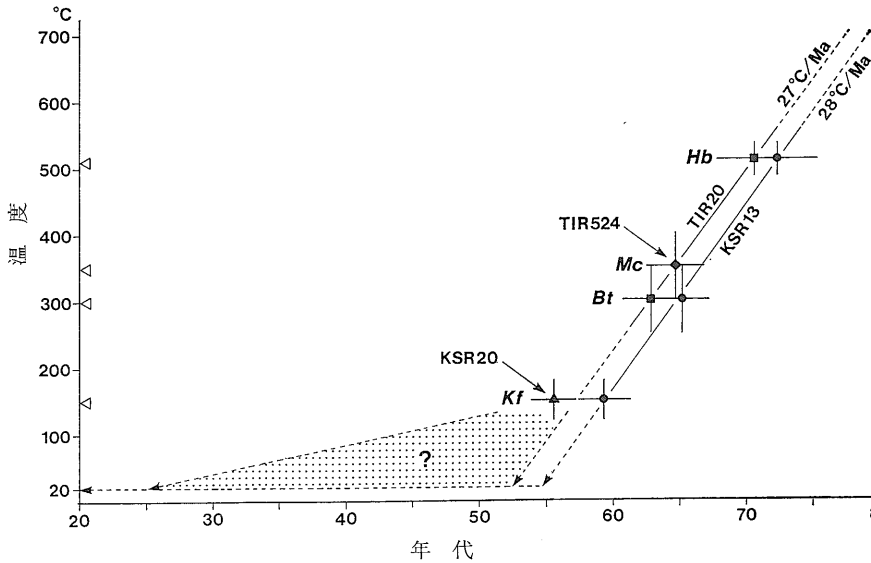
なお t は加熱時間である。

第5図中の直線は 78-638 と 78-629 のカリ長石の点を結んだもので、この直線から $E=28.8 \text{ kcal/mol}$, $D_0/a^2=5.6/\text{sec}$ の値が求められた。そしてこれらの値を(2)式に入れて T_e を計算すると $132 \pm 13^\circ\text{C}$ という値が得られる。ただしここで $A=8.7$ (板状), $R=1.987 \text{ cal/mol}\cdot^\circ\text{K}$, $dT/dt=5^\circ\text{C/Ma}$ である。この場合に、 dT/dt を 30°C/Ma とすると T_e は 152°C と高くなる。この値が第1表の閉鎖温度のまとめの中に使われている。なお、 a は実験に使用される鉱物粒子の実際の大きさではなく、マイクロクリンの場合はパーサイト・ラメラの厚さ (数 μm) にほぼ対応する。

私達は領家花崗岩類 (柴田・高木, 1988) や五反田礫岩の花崗岩礫 (佐藤ほか, 1990) などの鉱物の K-Ar 年代から岩体の冷却史を考察した際、カリ長石の閉鎖温度として Harrison and McDougall (1982) の値を採用した。そして、角閃石、黒雲母、カリ長石の3点が年代、閉鎖温度の関係図で一直線上に乗ることを認めた (第6図)。このことから、岩体は約 500°C から 150°C までほぼ一定の速度で冷却したと考えた。

カリ長石の閉鎖温度の見積りについては、この他にもいくつかの研究例がある。Foland (1974) は正長石のアルゴン拡散実験のデータから、 μm のオーダーのパーサイト構造をもつカリ長石の閉鎖温度を約 150°C と予想した。Harrison et al. (1979) は他の鉱物の年代と閉鎖温度で作られた冷却曲線から約 160°C という温度を推定した。Harrison and McDougall (1982) が $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 抽出実験で求めた値は、上にものべたように 30°C/Ma の冷却速度では 152°C である。

Heizler et al. (1988) は北米東部の深成岩体 (貫入年代: $\sim 370\text{Ma}$) からのカリ長石の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法による測定を行い、Chain of Ponds 岩体からの正長石について $242 \pm 15^\circ\text{C}$ と $317 \pm 15^\circ\text{C}$ 、マイクロクリンについて $185 \pm 6^\circ\text{C}$ という異なる閉鎖温度を得た。この正長石はパーサイト構造をもっていないので、マイクロクリンよりは高い閉鎖温度を示すことは理解できる。それよりも、この結果は岩石の冷却史をより正確に知るためには、個々のカリ長石の閉鎖温度を求めることが必要であることを物語っている。ごく最近、Lovera et al. (1989) は Heizler et al. (1988) のデータを再検討し、“Distribution of diffusion domain sizes” というモデルを提唱し、これによ

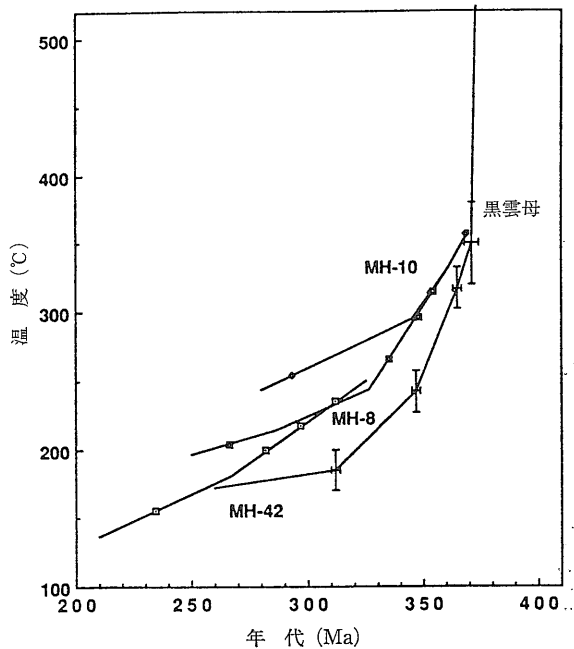


第6図
領家花崗岩類の冷却史
(柴田・高木, 1988).
Hb: 角閃石, Mc: 白雲母, Bt: 黒雲母, Kf: カリ長石.

り年代スペクトルや Arrhenius プロットをよりよく説明できることを示した. 具体的には, 4つの異なる大きさ(2)式のa)の粒子を仮定して, 実測された曲線に合わせることを行った. これにより, 1つのカリ長石ごとに4つの異なる閉鎖温度と年代が与えられることになり, その結果を第7図に示した. Heizler et al. (1988)により185°Cの閉鎖温度をもつとされたマイクロクリンは, このモデルでは235°~156°Cの範囲の閉鎖温度をもつことになる. 第7図には Heizler et al. (1988)の冷却曲線も示してあるが, “Distribution of diffusion domain sizes”のモデルによる曲線は, それより上方に位置する. その理由は, Heizler et al. (1988)は閉鎖温度を最小粒子の部分で求めたが, それを最大粒子の年代(プラト-年代)と対応させたためである.

以上の研究結果を総合すると, カリ長石の閉鎖温度を一つの値に定めることはもはやできないことは明らかである. カリ長石は個々に異なる複雑な構造をもっており, 拡散の特性についてのデータなしで, 閉鎖温度をきめることは不可能である. 先に紹介した花崗岩の冷却史の場合も, カリ長石の閉鎖温度を150°Cと定めたことは問題があろう. 第6図において, カリ長石の閉鎖温度を150°Cより高め(例えば180°C)に想定した方が低温領域の冷却曲線がよりスムーズになるとも考えられる. この問題の解決には $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法による段階加熱実験がどうしても必要である. 先にのべたように, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法による測定をよくコントロールされた条件下で行えば, 拡散に関するデータも得られる訳であり, カリ長石は岩体の冷却史の特に低温領域についての重要な情報を提供してくれるはずである.

1991年1月号



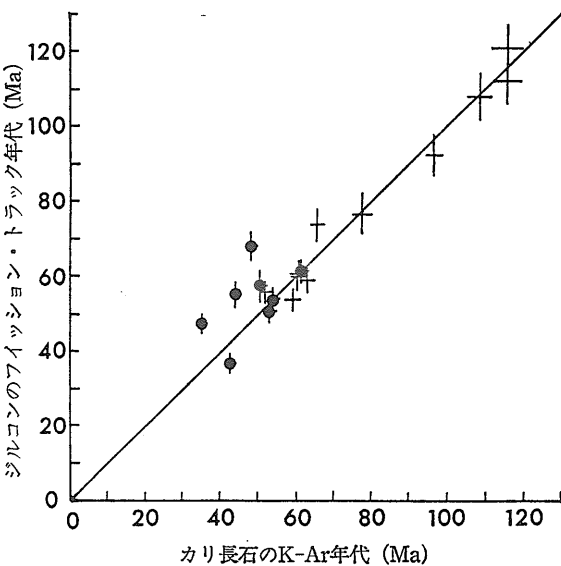
第7図 Chain of Ponds 岩体の冷却史 (Lovera et al., 1989).
3個のカリ長石の各々について複数の閉鎖温度と年代から冷却曲線が得られる. 下方の曲線は単一の閉鎖温度を仮定した場合の冷却曲線 (Heizler et al., 1988).

5. ジルコンのフィッシュン・トラック年代との比較

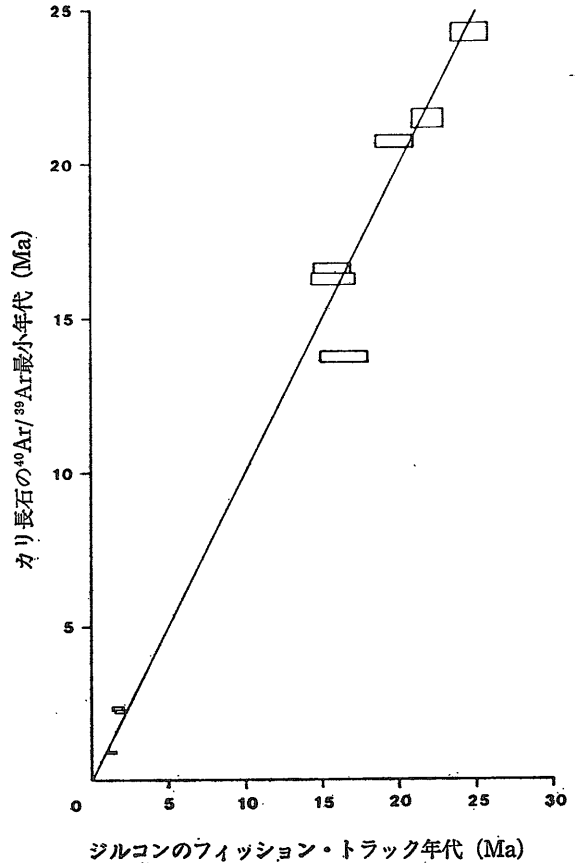
最後に地質調査所における年代測定結果にもとづき, 全く別の視点にたつて行ったカリ長石の閉鎖温度に関する研究を紹介する.

第2図に花崗岩類のカリ長石と黒雲母の K-Ar 年代の比較を示したが、この図からもカリ長石の閉鎖温度は黒雲母のそれ (~300°C) より低いことは明らかである。私達は同一岩石についてカリ長石の K-Ar 年代と共にジルコンのフィッシュン・トラック年代も測定することにした。そして両鉱物の年代を比較したところ、面白いことに一部の例外を除いて両者はほぼ等しいことがわかった (Shibata et al., 1990)。その結果を第8図に示す。両鉱物の年代がほぼ等しいということは、閉鎖温度もほぼ等しいことを意味する。年代測定を行ったカリ長石の大半はマイクロクリンで、多かれ少かれパーサイト構造もっている。ただしマイクロクリンの三斜度にはかなりの差がある (Shibata et al., 1990)。それにもかかわらずカリ長石とジルコンの年代が一致するという事は、カリ長石のアルゴンに対する拡散特性が似かよっているという事を表しているものと解釈される。第8図の中で黒点のついているものは、中央構造線近くの岩石でカタクラサイト化の影響を受けたものである。フィッシュン・トラック年代の方が明らかに古いものは、1点を除いてすべてカタクラサイト化の影響を受けたものである。先にカリ長石の年代低下の原因の一つとして、変形をあげたが、この場合のカリ長石の若い年代は、あるいは変形で説明ができるのかも知れない。

カリ長石の K-Ar 年代とジルコンのフィッシュン・トラック年代とがほぼ等しいということは、私達が最初



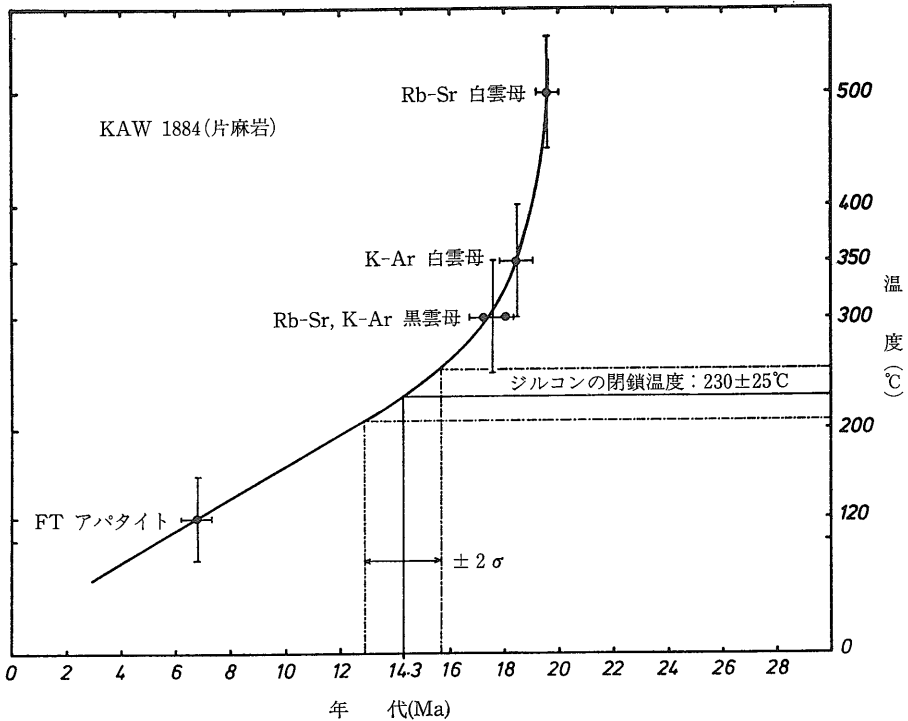
第8図 白亜紀花崗岩類のカリ長石の K-Ar 年代とジルコンのフィッシュン・トラック年代との比較 (Shibata et al., 1990)。黒点をつけたものは中央構造線近くの岩石でカタクラサイト化の影響を受けたもの。



第9図 カリ長石の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 最小年代とジルコンのフィッシュン・トラック年代との比較 (Zeitler and Fitz Gerald, 1986)。

に報告したことでなく、すでに Zeitler and Fitz Gerald (1986) によって報告されていた。彼らはパキスタンのヒマラヤ山脈の花崗岩類について、カリ長石の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代スペクトルにおける最小値がジルコンの年代とよくあうことを示した (第9図)。これらのカリ長石には過剰アルゴンが含まれているため、通常の K-Ar 年代値は地質学的に意味をもたない古い値となる。また一致年代を示すものも 1~25Ma と比較的若いものである。この結果と比較して、私達のデータはもっと古い年代まで一致する点が重要である。おそらく、100 Ma をこす年代範囲まで両鉱物の年代が等しいことを示したのは私達が初めてであろう。さらに両鉱物の年代が等しいということは、前述したように使用した白亜紀花崗岩のカリ長石の拡散特性が似かよっているという重要な事実をも暗示している。

そこで、もしジルコンの閉鎖温度がかなり正確にわかっているならば、カリ長石の閉鎖温度もきめることができることになる。しかし、残念ながらジルコンについては今



第10図 スイスアルプスの変成岩の冷却史 (Hurford, 1986)。冷却曲線からジルコンの閉鎖温度が求められる。

のところあまり正確にきめられているとは言い難い。なぜならば、ジルコンの閉鎖温度は他の鉱物の年代と閉鎖温度から、冷却曲線上で求められるためである。第10図は Hurford (1986) がスイスアルプスの変成岩について求めた例である。白雲母 (閉鎖温度: 500°Cと350°C), 黒雲母 (300°C), アパタイト (120°C) の点を結ぶ曲線からジルコンの閉鎖温度は 230°C と求められる。Hurford (1986) はいくつかの測定の平均値として 240±50°C という値を得た。しかしこの図からわかるように、黒雲母とアパタイトを結ぶ区間の線の引き方にはかなりの任意性があり、たとえばジルコンの閉鎖温度を 180°C としてもスムーズな曲線が引けない訳ではない。同じような方法でこれまでに Harrison et al. (1979) は 175°C という低い値を報告している。

これらの方法に比べて、私達が行ったカリ長石とジルコンの年代を比較するという方法は、少なくともジルコンの閉鎖温度をある程度限定できるという点で、より重要と考えられる。前節で紹介したように、カリ長石の閉鎖温度は一義的にはきめられないことは確かである。しかし新しいデータも含めて考察すれば、パーサイト構造をもったカリ長石の閉鎖温度は 200°C をこすことはないように思われる。もしそうならばジルコンの閉鎖温度も 200°C をこすことはないであろう。

アルゴン損失による年代低下という現象のために、一時期ほとんど忘れられていたカリ長石の年代測定は、⁴⁰Ar/³⁹Ar 法という新しい測定技術によって復活し、熱史の研究においてきわめて重要なデータを提供しはじめている。地質調査所においても、今後カリ長石の鉱物学的特性のくわしい検討が必要であり、一方では ⁴⁰Ar/³⁹Ar 法による年代測定の早急な実現が望まれるところである。

文 献

Dalrymple, G. B. and Lanphere, M. A. (1969): Potassium-argon Dating. Freeman, 258 p.
 Dodson, M. H. (1973): Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contrib. Mineral. Petrol., 40, 259-274.
 Dodson, M. H. and McClelland-Brown, E. (1985): Isotopic and palaeomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion. Geol. Soc. Mem., no.10, 315-325.
 Foland, K. A. (1974): Ar⁴⁰ diffusion in homogeneous orthoclase and an interpretation of Ar diffusion in K-feldspars. Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 151-166.
 Harrison, T. M. and McDougall, I. (1981): Excess ⁴⁰Ar in metamorphic rocks from Broken Hill, New South Wales: implications for ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectra and the thermal history of the region. Earth Planet.

- Sci. Lett., **55**, 123-149.
- Harrison, T. M. and McDougall, I. (1982): The thermal significance of potassium feldspar K-Ar ages inferred from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum results. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 1181-1820.
- Harrison, T. M., Armstrong, R. L., Naeser, C. W. and Harakal, J. E. (1979): Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 400-410.
- Heizler, M. T., Lux, D. R. and Decker, E. R. (1988): The age and cooling history of the Chain of Ponds and Big Island Pond plutons and the Spider Lake Granite, west-central Maine and Quebec. *Am. J. Sci.*, **288**, 925-952.
- Hurford, A. J. (1986): Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 413-427.
- Lovera, O. M., Richter, F. M. and Harrison, T. M. (1989): The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooling samples having a distribution of diffusion domain sizes. *J. Geophys. Res.*, **94**, 17917-17935.
- Naeser, C. W. and Forbes, R. B. (1976): Variations of fission track ages with depth in two deep drill holes (Abstract). *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **57**, 353.
- Parsons, I., Rex, D. C., Guise, P. and Halliday, A. N. (1988): Argon-loss by alkali feldspar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 1097-1112.
- Purdy, J. W. and Jäger, E. (1976): K-Ar ages on rock forming minerals from the Central Alps. *Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova.*, **30**, 31 p.
- Sardarov, S. S. (1957): Retention of radiogenic argon in microcline. *Geochemistry*, no. 12, 233-237.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (1990): 関東山地北部の新第三系に含まれる花崗岩質礫の K-Ar 年代—五反田礫岩の例—。地質雑, **96**, 125-132.
- 柴田 賢・高木秀雄 (1988): 中央構造線沿いの岩石および断層内物質の同位体年代—長野県分杭峠地域の例—。地質雑, **94**, 35-50.
- 柴田 賢・杉山雄一・高木秀雄・内海 茂 (1988): 奈良県吉野地域の中央構造線沿いに分布する諸岩石の同位体年代。地調月報, **39**, 759-781.
- 柴田 賢ほか9名 (1989): 精密年代測定による断層活動性評価の研究。原子力平和利用に関する研究成果報告書, 第七集, 10/1-5.
- Shibata, K., Danhara, T. and Takagi, H. (1990): Concordance between K-Ar ages of K-feldspar and fission-track ages of zircon in Cretaceous granitic rocks from Japan. *Geochem. J.*, **24**, 187-192.
- 高木秀雄・柴田 賢・杉山雄一・内海 茂・松本哲一 (1989): 三重県粥見地域の中央構造線沿いに分布する諸岩石の同位体年代。岩鉱, **84**, 75-88.
- Wetherill, G. W., Aldrich, L. T. and Davis, G. L. (1955): $\text{Ar}^{40}/\text{K}^{40}$ ratios of feldspars and micas from the same rock. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **8**, 171-172.
- Zeitler, P. K. and Fitz Gerald, J. D. (1986): Saddle shaped $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra from young, microstructurally complex potassium feldspars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1185-1199.

SHIBATA Ken (1991): K-Ar age and closure temperature of potassium feldspar.

<受付: 1990年8月20日>