ヒマラヤ変成岩, 花崗岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代における問題点

Some problems on ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological studies for Himalayan metamorphic and granitic rocks

Abstract

瀧上 豊* 金子慶之**

Yutaka Takigami*
and Yoshiyuki Kaneko**

1996年9月1日受付.

1997年1月27日受理.

* 関東学園大学.

Kanto Gakuen University, Ohta 373, Japan

** 東京工業大学理学部地球惑星科学科.

Department of Earth and Planetary Sciences,

Tokyo Institute Technology, Meguro 152,

Japan

There are many ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological studies for samples from Himalayan metamorphic and igneous rocks. However, there are some problems about these age results owing to the complicated metamorphism, the existence of excess Ar and the difficulty of collecting good samples for dating. We summarize these problems regarding ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Himalayan rocks and show some reasonable ages.

Key words: ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological study, ^{40}Ar - ^{39}Ar age, age spectrum, isochron plot, excess argon

はじめに

ヒマラヤの変成史や上昇問題を論じるためには、岩石の年代を知ることがかせない。そして、変成岩の年代測定に適した ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代の報告が最近多く見られるようになってきた。しかし、試料採取の難しさから年代測定に使える試料の数が少ないこと、および、複雑な変成史をもつ色々な変成岩に年代測定を適用するために、いままでの ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定結果においても、測定が行われたすべての結果が報告されているのが現状である。本論では、ヒマラヤの変成岩に対する ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定の特徴や問題点を整理したうえで、信頼度の高い年代をいくつかの論文報告から選んでまとめる。なお、本論では ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定法の説明はあまりしていない。詳しく知りたい場合は McDougall and Harrison (1988) や 兼岡 (1988) などを参照してもらいたい。

ヒマラヤの岩石における ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定と そのいくつかの問題点

1. 試料

変成岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定の結果を参照するときは、どのような鉱物を用いて、得られた年代が何の年代を表しているかをはっきりさせる必要がある。色々な鉱物における Ar ガスの閉鎖温度 (一般的には角閃石; 500-550°C, 白雲母; 350°C, 黒雲母; 300°C, カリ長石; 150-250°C; McDougall and Harrison, 1988) の違いから、その変成岩の熱履歴を調べることがよく行われている。また、花崗岩の年代を得るときに花崗岩により熱変成をうけた試料の年代測定を行うことがある。これは、花崗岩貫入による熱の影響で、周囲の岩石の K-Ar システムがリセットすることを利用するわけである。また、花崗岩そのものを測定した場合、後述するような花崗岩中の過剰アルゴンの影響がでてくる場合が多いので、

これを極力避ける意味も含まれている。ヒマラヤにおいては優白色花崗岩 (leucogranite) の年代測定にこの手法が多く見られる (例えば, Hubbard and Harrison, 1989; Guillot et al., 1994)。

また、大きな熱変成のあとに熱水などによる低温の変成があった場合には、閉鎖温度の低い鉱物 (例えばカリ長石) では K-Ar システムが再リセットし年代の若返りが起こるが、閉鎖温度の高い鉱物 (例えば角閃石) ではリセットしない。このようなことに気がつかないでこれらの岩石から求めた冷却史は意味がない。したがって、年代測定に用いる試料は顕微鏡や野外での十分な観察を行ったうえで、選ばなければならない。

2. 実験方法

現在岩石を溶かして Ar ガスを抽出には次の3種類の方法がある。(i) 一般的なのは抵抗加熱方式と呼ばれるもので、タンタルチューブをヒーターで熱し、真空にしたチューブの中で岩石を溶かす方法である。この実験方法の利点は熱電対により温度が正確 ($\pm 10^\circ\text{C}$ 以内) に測定できることにある。(ii) 高周波加熱方式は、真空中に置かれたモリブデンるつぼの外部から高周波を流し、電磁誘導により加熱されたるつぼで試料を溶かす方法である。これは、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定における原子炉内での中性子照射により放射化した試料を安全に取り扱える利点はあるが、放射温度計を用いて温度を決めるために、絶対温度の測定が難しい。 $\pm 50^\circ\text{C}$ はみておいたほうが無難である。(iii) 最近、レーザー光線を用いて鉱物などの微量試料を溶かす方法がよく行われている。アルゴンレーザー光線を試料に連続照射し、段階加熱方式で試料を溶かす方法と、半導体レーザーを用いて、鉱物や岩石の微小部分を1回のパルスで溶かす方法がある。このレーザー加熱方法の利点は、顕微鏡で選んだ新鮮なひとつぶの鉱物の年代を求めることである。連続レーザーの場合、温度ステップはレー

Fig. 1. Age spectra (a,b) and isochron plots (c,d) for samples L118 and X12. These figures are taken from Macfarlane (1993) (figures-a, c) and Copeland et al. (1990) (figures-b, d).

ザーの出力を段階的にあげることで調節するが、温度測定の難しいことが難点である。パルスレーザーは1つの岩石や鉱物試料の中心部分と周辺部分の年代の違いを求め、その岩石や鉱物の熱履歴を研究することなどに用いられている (Hodges et al., 1994)。レーザーを用いた ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定法は現在かなり普及しているが、ヒマラヤの試料に対してはレーザー加熱方式を用いた報告例はまだ数少ない。Harrison がインド南東のベンガル湾の ODP (Ocean Drilling Program) 試料やシワリークの堆積岩中のカリ長石の粒の年代測定 (Copeland and Harrison, 1990; Harrison et al., 1993) に、Turner がチベットの岩石 (Turner et al., 1993) に、Hodges がマナスル花崗岩 (Guillot et al., 1994) に用いている例などがある。一粒の鉱物の年代測定ができることは変成岩には適した方法なので、ヒマラヤの試料に対しても、今後レーザーを用いた年代測定の結果が増えてくるであろう。

3. データ図示方法

得られたデータを図示する方法として Age Spectrum と Isochron Plot の2つがある。

Age Spectrum (または Age Diagram) は縦軸に見かけの

年代値 (岩石中にトラップされている初生アルゴンの ^{40}Ar ^{36}Ar の値を大気アルゴンの 295.5 と仮定して計算した年代) にとり、横軸には抽出された ^{39}Ar の全量を 100% とし、左から温度ステップ順にデータをプロットしたものである。K-Ar システムの時計がリセットしてから変成や変質による Ar ガスの逸脱がなければ、各温度ステップの年代は同じになり、Spectrum は平らになる。これを plateau と呼び、その年代は信頼性の高いものになる (Fig. 1-a, b)。しかし、きれいに plateau になることは少なく、変質により左下がりになったり、ガスの再分配 (何らかの理由で鉱物外に Ar ガスが抜けず鉱物中で移動する現象) により右下がりになったりすることが多い。2つ以上の温度ステップが標準偏差の2倍の範囲で年代が重なり、 ^{39}Ar の量がある程度の割合を占めている場合を通常 plateau と呼ぶことが多いが (McDougall and Harrison, 1988)、この判定は主観的であり、往々にして論文の筆者にとって都合のよい年代を plateau とすることがあるので注意を要する。

また、過剰 Ar がある場合も、Age Spectrum は乱れてくる。これは、深成岩や貫入岩などにおいてマグマ中に残留していた Ar ガスが抜けきれずに固化したときや、変成岩が熱

Fig. 2. Age spectrum (a) and isochron plot (b) for sample X10. The features of excess Ar (U shape and lower $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ratio than that of air) are shown on both figures. These figures are taken from Copeland et al. (1990).

変成を受ける際、以前の年代情報を持ったアルゴンガス（大気より高い $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比をもつ）が十分抜けきれなかったときに見られるパターンである。一般的には真ん中が下がった凹型（U字型）になることが多い。真の年代値は真ん中の一番若い年代より若いと解釈される。ヒマラヤの年代測定結果にはたいへんよく見られるパターンである。（Fig. 2-a）

Isochron Plot は Isochron diagram や Isotope correlation plot とも呼ばれる。以前の Isochron Plot は縦軸に $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 、横軸に $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ をとり、大気アルゴンの補正を行わないデータをプロットする。Age Spectrum で plateau が得られるようなデータは Isochron Plot ではデータが一直線上に並び、直線の傾きが年代を、縦軸の切片が大気アルゴンの $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比の 295.5 となる。また、最近のヒマラヤの年代測定結果に用いられているのは Inverse Isochron Plot と呼ばれるものである。これは、縦軸に $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 、横軸に $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ をとる（Fig. 1-c, d）。データは Isochron Plot 同じように直線にのるが、縦軸切片は大気アルゴンの場合、0.00338、横軸切片が年代値となる。この表示方式では同じ同位体比をもつ過剰アルゴンがすべての温度ステップに入っている場合、データは直線上にのり、縦軸切片は 0.00338 より低い値を示す（通常過剰アルゴンの $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比は大気の場合より高いので逆数では低くなる）（Fig. 2-b）。試料によっては、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比の異なる 2 成分の過剰アルゴンが入っている場合もある（Hubbard and Harrison, 1989）（Fig. 4-a; Isochron plot）。また、Isochron Plot に伴って MSWD（McIntyre et al., 1966）なるものがでてくる。これは、York (1969) の SUMS と $\text{MSWD} = \text{SUMS}/(n-2)$ （ n はデータ数）の関係があり、ともに χ^2 検定の際で出てくる変数であり、直線が誤差範囲でフィットしているかどうかを表す量である。 χ^2 の表の数値と比較してデータの検討を行う。表の値より MSWD が大きいとデータのばらつきが誤差範囲を超えていると判断して、ばらつきの原因を実験以外のところに求めなければならない。

McDougall and Harrison (1988) は 10 個程度のデータ数の場合、2.5 程度の値を目安にし、それより大きい場合は得られた Isochron 年代は有効でないと考えている。

この手法はもともと Rb-Sr 年代の解析に使われる方法であるが、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法でも用いられている。

この方法はデータの棄却の論理と著者は理解しているが、ヒマラヤに関する論文をみていると MSWD の大小で年代の信頼性を論じたり（Macfarlane, 1993）、MSWD が小さくなるようにデータの一部分を用いて Isochron を引いて年代を求めたりしている（Copeland et al., 1991）のが気になるところである。

はじめに述べたように、ヒマラヤの変成岩、火成岩の場合、過剰アルゴンや複雑な変成作用に加え、試料の数が限られているので、実験で得られたすべての ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代結果を用いて論文が作成されていることが多い。そのため、著者に都合なデータ図示方法や年代解析のみが行われている場合があるので注意が必要である。

そのほかに K/Ca Plot がある。これは縦軸に ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定時に得られる ^{39}Ar 、 ^{37}Ar から計算した K/Ca をとり、横軸は Age Spectrum と同じ ^{39}Ar の割合をとる。脱ガスの温度があがっても K/Ca 比が変化しなければ、アルゴンガスは化学組成が単一な組織から抜けでていたことがわかる。鉱物の年代測定に際して、鉱物分離がうまくいっていない場合や、鉱物の組成が一樣でない場合などは K/Ca 比は乱れる。年代の信頼性を確認するための補助データとして用いる。今回扱ったヒマラヤの論文の中では Hubbard and Harrison (1989) にのみ、1 例図示されていた（Fig. 4-a; K/Ca plot）。

4. データ解析方法

Harrison はカリ長石のデータ解析に独特の方法を用いている。カリ長石の閉鎖温度は 150-250°C 程度と低く、冷却速度が遅い場合、カリ長石全体の K-Ar システムが閉鎖するまでに時間がかかるので、左下がりの独特の Age Spectrum（Fig. 3）を示す。このような Age Spectrum の場合、一番若

Fig. 3. Age spectrum for sample for K-feldspar sample DK 200. This age spectrum shows a typical pattern of slow cooled K-feldspar sample. This figure is taken from Copeland et al. (1990).

い年代のときにカリ長石全体が閉鎖温度になり K-Ar システムが閉じたと考え、その若い年代 (minimum age) を採用する。Harrison はさらに、粒子サイズを仮定した Ar ガス拡散モデルにより計算して得られた Age Spectrum と合わせることで、かなり詳細な冷却モデルを作成してその岩石の熱履歴を論じている (例えば, Richter et al., 1991)。低温の K-Ar システム閉鎖温度をもつカリ長石のデータは、ヒマラヤの上昇問題を論じる上では貴重なデータである。しかし、シュミレートして得られた結果の信頼性は今後の議論によるだろう。また、このようにして得られた熱履歴データを他の鉱物を用いて得られた熱履歴データと一緒に扱ってよいかどうかは難しい。

5. 過剰アルゴン問題

Age Spectrum において、以前から変成岩中の黒雲母が見かけの plateau 年代を示すことが問題にされていたがヒマラヤの岩石においてもよく見られるようだ。これは過剰アルゴンが黒雲母中で再分配をして、Age Spectrum において plateau を示すが、同じ岩石から得られた、黒雲母より閉鎖温度の高い角閃石や白雲母のほうが若い年代を示すことから判断される (Fig. 4-a, b)。このような場合にはふつう Isochron Plot も役には立たない。しかし, Hubbard and Harrison (1989) のように黒雲母年代のほうが角閃石年代より 30 m.y. も古ければすぐにわかるが, Macfarlane (1993) のように白雲母年代が黒雲母年代より数 m.y. 若いだけだと判断が難しい。もし、ヒマラヤ変成岩で黒雲母年代しか得られていない場合に、この年代値を引用するときは、過剰アルゴンの影響があるかどうか十分な注意が必要である。しかし, Macfarlane (1993) が年代測定を行った Langtang National Park 地域 (中央ネパール) の片麻岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代結果にこの現象が多く現れている理由はよくわからない。岩

石学と年代学の両面からの詳しい研究が今後必要であろう。

6. 年代標準試料

^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定はそれ自体で絶対年代のする方法ではない。年代値はすでに年代のわかっている標準試料と比較して得られている。標準試料の年代値は K-Ar 法などにより何回も測り込まれた値を使用するが、各実験室により使用する標準試料、およびその年代値は微妙に異なってくる (Baksi et al., 1996)。したがって、同じ研究室で同じ標準試料、同じ年代値を用いて得られた ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代値は比較できるが、違う実験室や新旧の論文の年代値どうしを比較するときは注意が必要である。20 Ma より若い年代で論じるときはあまり差はでないが、それでも 0.1 m.y. 程度の誤差はこの年代標準試料の問題により生じる。

ヒマラヤにおける ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代のまとめ

Table 1 に以下の 1.-3. 地域の主な ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代をまとめてある。過剰アルゴンが少なく、Age Spectrum における plateau の状態や Isochron Plot におけるデータのばらつきなどから総合的に判断して信頼性の高い年代を選んでみた。また、各論文においては採取した試料がどの構造体に属するのか曖昧なものもあるが、その区分は著者の判断による。以下、いくつかの地域や岩相ごとに年代とその特徴をネパールの MCT 地域を中心にまとめる。

なお、Fig. 5 には以下の論文にてくる ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代試料の採取地点を示してある。

1. 優白色花崗岩 (leucogranite)

優白色花崗岩は MCT (Main Central Thrust) の北側地域、テチス堆積物地域、さらに STDS (South Tibetan Detachment System) の北側地域までの広い地域に分布している。年代測定は花崗岩そのものを年代測定している場合 (例えば, Copeland et al., 1987b; Maluski and Xiao, 1988; Copeland et al., 1990) と、接触変成作用を受けた片麻岩や片岩などを測定して花崗岩の貫入年代としている場合 (例えば, Hubbard and Harrison, 1989; Guillot et al., 1994) がある。年代は大きくばらついており、角閃石で 20-23 Ma, 白雲母、黒雲母で 11-20 Ma, カリ長石で 4-20 Ma となっている。地域による年代の差もなく、空間および時間上おおきくばらついているのがヒマラヤ優白色花崗岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代の特色である。しかし、ばらつきの原因が試料にあるのか地域の特性なのかは現在のところわからない。

Hodges et al. (1992) は優白色花崗岩の年代測定を用いてエベレスト地域の STDS の断層の動いた年代を 19-22 Ma としている。これは、断層により切られている花崗岩の年代 (U-Pb 法: Titanite; 19.5 ± 1.3 Ma, Xenotime; 20.6 ± 0.1 - 21.6 ± 0.1 Ma) と切っている花崗岩により接触変成を受けている片岩の角閃石の年代測定の結果 (^{40}Ar - ^{39}Ar 法: 20.0 ± 0.9 Ma) から推定している。

Copeland et al. (1987b) もエベレスト北面の断層を切っている花崗岩の年代 (黒雲母 (Isochron 年代); 17.1 ± 0.1 Ma, 白雲母 (Isochron 年代); 16.7 ± 0.2 Ma, カリ長石 (Plateau 年代); 16.2 ± 0.1 Ma, 22 Ma) (注: 論文に Age Spec-

Fig. 4. (a) Age spectra of biotite and hornblende, K/Ca plot and isochron plot of hornblende, sample 87H12C. In the age spectrum, the ages of hornblende are apparently younger than those of biotite. The features of excess Ar are shown in age spectrum and isochron plot of hornblende. Two trapped components in the hornblende sample yield two isochrons that indicate roughly the same age. These figures are taken from Hubbard and Harrison (1989).

(b) Age spectra and isochron plots of muscovite and biotite for sample LT21. The age of muscovite is younger than that of biotite. These figures are taken from Macfarlane (1993).

trum や Isochron Plot が表示されていないので Table 1 にはこのデータはのせていない) から、断層の動きを 22 Ma 以前としている。

2. MCT-STDS の地域

エベレスト地域の一部の結果 (片麻岩の黒雲母; 20.2 ± 0.2 Ma (Hubbard and Harrison, 1989)) を除くと 4 Ma-14 Ma の年代が得られている。

また、この地域の角閃岩の角閃石と片麻岩の黒雲母、白雲母の年代測定結果には過剰アルゴンの様子が見うけられる (Hubbard and Harrison, 1989; Copeland et al., 1991; Macfarlane, 1993). 特に、角閃石と黒雲母に過剰アルゴンの影響がでている場合が多い。しかも、前述したように、Age Spectrum で白雲母の plateau 年代が黒雲母の plateau 年代より若くなっている場合もある (Hubbard and Harrison,

Fig. 5. Simplified geologic map of the Himalaya showing the major tectonostratigraphic divisions and sampling localities of rocks used in each geochronological studies mentioned in this paper.

Abbreviations are : MCT=Main Central Thrust, MBT=Main Boundary Thrust, STDS=South Tibetan Detachment System. Modified from Gansser (1964), Le Fort (1975), Barnicoat and Treloar (1989), Parrish and Hodges (1996).

(1) Guillot et al., 1994, (2) Copeland et al., 1990, (3) Maluski and Xiao, 1988, (4) Hubbard and Harrison, 1989, (5) Hodges et al., 1992, (6) Kaneoka and Kono, 1981, (7) Copeland et al., 1991, (8) Macfarlane, 1993, (9) Coleman and Hodges, 1995, (10) Copeland et al., 1987 b, (11) Harrison et al., 1993, (12) Copeland et al., 1987 a, (13) Richter et al., 1991, (14) Copeland et al., 1995, (15) Coulon et al., 1986, (16) Harrison et al., 1995, (17) Turner et al., 1993, (18) Treloar et al., 1989, (19) George et al., 1995.

Table 1 1. Some ^{40}Ar - ^{39}Ar ages for Himalayan metamorphic and granitic rocks

	Mt. Manaslu region	Langtang region	Mt. Everest region
Leucogranite (include augen gneiss, pegmatite, schist, contact aureol, etc.)	K: 4.1 (m), 10.7(m,*3), 13.5 (m) ⁽¹⁾ Bt: 16.5 (*2), ⁽²⁾ 18.3 (20.0, (*2)) ⁽²⁾ Mu: 13.3, 14.7, 16.0, 16.7, 18.4 ⁽²⁾ 18.5 (*4), 18.6 ⁽¹⁾ Hb: (22.8 (*1, *3)) ⁽¹⁾		K: 15.5 (m, *3), 18.7(m,*3), 21.7 (m, *3) ⁽⁴⁾ Bt: (10.7 (p)) ⁽³⁾ , 11.4 (p), 17.2 (*3)) ⁽⁴⁾ Mu: 10.9 (p), 12.3 (p), 15.0 (p,*4)) ⁽³⁾ 16.6 (*4), 17.0 (*4) ⁽⁴⁾ Hb: 20.0 (p, *4) ⁽⁵⁾ WR: (16.7 (p, *3), 16.8 (p, *1), 16.9 (p, *1)) ⁽⁶⁾
MCT-STDS region	K: (3.7 (*1, *2), 4.3(*1, *3)) ⁽⁷⁾ Bt: 3.8, 4.3, 13.5 (*1) ⁽⁷⁾ Mu: (3.8 (*1)), 6.1 (*1), 9.4 ⁽⁷⁾	Bt: (7.7 (*2), 8.0 (*2), 12.7 (*2)) ⁽⁸⁾ Mu: 4.6 (*2), 6.7 (*2), 6.9 (*2), 9.7 (*2) ⁽⁸⁾	K: 3.6 (m), 6.4 (m,*3) ⁽⁴⁾ Bt: 7.5 (*3), 9.1, 20.2 (*4) ⁽⁴⁾ Mu: 7.7 ⁽⁴⁾
MBT-MCT region	Bt: 4.2, (5.3 (*2)) ⁽⁷⁾ Mu: 3.1 (*1, *2)) ⁽⁷⁾ Hb: 15.2 (*1) ⁽⁷⁾	Bt: 2.3 (*4), ⁽⁸⁾ (7.8 (*2), 11.0 (*2)) ⁽⁸⁾ Mu: 6.9 (*2) 8.5 ⁽⁸⁾	

K: K-feldspar, Bt: biotite, Mu: muscovite, Hb: hornblende, WR: Whole rock

All ages are isochron ages without m (minimum age) and p (plateau age) in the parenthesis.

*1; there is a feature of excess Ar.

*2; biotite age is older than muscovite age.

*3; uncertainty is over ± 0.5 Ma.

*4; bold figures mean more reliable ages.

(1) Guillot et al., 1994, (2) Copeland et al., 1990, (3) Maluski and Xiao, 1988,

(4) Hubbard et al., 1991, (5) Hodges et al., 1992, (6) Kaneoka and Kano, 1981,

(7) Copeland et al., 1991, (8) Macfarlane, 1993.

1989). Macfarlane (1993) は Isochron Plot において MSWD が大きくなる (数十から数百) ことと $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比が大気アルゴンより若干低くなることで過剰アルゴンのはいった黒雲母の plateau 年代を区別している. この地域の片麻岩などの黒雲母の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代値をそのまま引用することは危険である.

また, 1. の優白色花崗岩の熱変成により, 年代が若くなっている試料もあるかもしれない.

なお, Hubbard and Harrison (1989) では, 角閃岩の角閃石で $20.9 \pm 0.2 \text{ Ma}$ の年代値を求めているが, 地域の区分が MCT の北か南かはっきりしないので, 表からは除いた.

3. MCT-MBT (Main Boundary Thrust) 地域

この地域の年代は 2-15 Ma で MCT-STDS 地域とよく似た年代を示しているが, $2.3 \pm 0.04 \text{ Ma}$ (断層粘土中の黒雲母), $3.1 \pm 0.2 \text{ Ma}$ (雲母片岩中の白雲母) といった極めて若い年代が得られているのが特徴である (Copeland et al., 1991; Macfarlane, 1993). この若い年代の信頼性が問題になるところだが, 論文のデータからはこの年代の信頼性を損なうものはいない (Fig. 1-a).

2. の MCT-STDS 地域でも 4Ma 前後の年代値があるので, 2. および 3. 地域をあわせた MBT-STDS 地域での 3-4 Ma の若い年代値に対応する MCT に関連するテクトニクス (例えば, 脆性変形 (Macfarlane, 1993) など) の考慮も必要である. 優白色花崗岩のカリ長石の minimum age ($4.3 \pm 0.3 \text{ Ma}$) (Guillot et al., 1994) も関係があるかもしれない.

この地域の角閃石, 白雲母, 黒雲母にも過剰アルゴンが入っている様子が見られるので, 年代値は Isochron 年代を採用した方がよい. また, 白雲母年代 < 黒雲母年代の逆転現象も (b) の地域と同様に存在する (Copeland et al., 1991; Macfarlane, 1993).

4. シワリーク地域

Table 1 にはのせていないが, Harrison et al. (1993) がシワリーク地域の砂岩中のカリ長石についてレーザー光線を用いた方法で 5-25 Ma の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代 (minimum age) を求めており, 古地磁気から得られた堆積年代との差は 3 Ma 以内であると論じている. また, 結果と粒子サイズなどの仮定を用いて, 熱履歴をシュミレートしている.

このシワリーク地域の結果はベンガル湾の ODPLeg 116 のカリ長石の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代測定結果 (Copeland and Harrison, 1990) と比較, 検討されている.

5. STDS-ITS (Indus Tsangpo Suture) 地域

Coleman and Hodges (1995) は, アンナプルナの東側の断層地帯の熱水活動によってつくられた白雲母の年代, 約 14 Ma ($14.2 \pm 0.9 \text{ Ma}$, $14.3 \pm 0.9 \text{ Ma}$) をレーザー光線を用いた $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法により求めている. 2 試料だけの年代測定結果ではあるが, データの質はよい. この断層地域の年代は STDS の動きを表していると考えられるので, ヒマラヤの上昇を考える上で貴重な年代である.

6. その他の地域

本論文の対象地域とは異なっているが, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代に関する論文をいくつか紹介したい.

Copeland et al. (1987 a, 1995), Richter et al. (1991), Harrison et al. (1995) は南チベットの變成岩や花崗岩中の角閃石, 白雲母, 黒雲母, カリ長石など鉱物の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代測定を行っている (17-27 Ma; Copeland et al. (1987 a), 42-94 Ma; Copeland et al. (1995), 18-35 Ma; Richter et al. (1991), 3-8 Ma; Harrison et al. (1995)). そしてその年代差と K-Ar システムでの閉鎖温度の違い, および, カリ長石の年代測定データからモデル計算された冷却速度を用いて, 南チベット高原の上昇速度を見積もっている.

Coulon et al. (1986) は南-中央チベット高原の 10-120 Ma にわたる火山活動の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代を求め, 岩石の化学組成のデータとともにして, インドの衝突を含めた長い期間にわたるテクトニクスを論じている.

Turner et al. (1993) は, 中央チベット高原の若い火山活動の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代 (0.3-13.3 Ma) をレーザー光線を用いた方法で求め, 最近のチベット高原の上昇について論じている.

また, Treloar et al. (1989) は西ヒマラヤのパキスタン地域の数多くの火山岩, 花崗岩, 變成岩の K-Ar, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代測定を行い, 20 Ma-107 Ma の結果を得て, 同地域のテクトニクスを総合的に論じている. George et al. (1995) も同地域の變成岩や花崗岩, 19 試料の $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代測定を行い, 4-30 Ma の年代から同地域の上昇に伴う冷却史を論じている.

おわりに

ネパールヒマラヤ地域を中心に $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代を求めてみた. すべてを網羅したわけではないが, 試料採取や過剰アルゴンの面などから, なかなか良い年代が得られていないのが現状である. しかし, 今述べてきたように, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代に関する大枠がなんとなく見えてきたような気がする. 今後はいままでの研究をふまえた上で, 地質学, 岩石学, 年代学のすべての面から考慮した年代を測定または選択することが, ヒマラヤ地域のテクトニクスの研究の一層の発展につながるだろう.

文 献

- Baksi, A.K., Archibald, D.A. and Farrar, E., 1996, Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standard. *Chemical Geol.*, **129**, 307-324.
- Barnicoat, A.C. and Treloar, P.J., 1989, Himalayan metamorphism—an introduction. *Jour. Metamorphic. Geol.*, **7**, 3-8.
- Coleman, M. and Hodges, K., 1995, Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, **374**, 49-52.
- Copeland, P. and Harrison, T.M., 1990, Episodic rapid uplift in the Himalaya revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis of detrital K-feldspar and muscovite, Bengal fan. *Geology*, **18**, 354-357.
- Copeland, P., Harrison, T.M. and Le Fort, P., 1990, Age and cooling history of the Manaslu granite: implications for Himalayan tectonics. *Jour. Volcan. Geotherm. Res.*, **44**, 33-50.
- Copeland, P., Harrison, T.M., Kidd, W.S.F., Ronghua, X. and Yuquan, Z., 1987 a, Rapid early Miocene acceleration of uplift in the Gangdese Belt, Xizang (southern Tibet), and its bearing on accommodation mechanisms of the India-Asia collision. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **86**, 240-252.
- Copeland, P., Harrison, T.M., Parrish, R., Burchfiel, B.C., Hodges,

- K. and Kidd, S.F., 1987b, Constraints on the age of normal faulting, north face of Mt. Everest: Implications for Oligo-Miocene uplift. *EOS*, **68**, 1444.
- Copeland, P., Harrison, T.M., Hodges, K.V., Maruyajol, P., Le Fort, P. and Pêcher, A., 1991, An early Pliocene thermal disturbance of the main central thrust, central Nepal: implications for Himalayan tectonics. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, B5, 8475-8500.
- Copeland, P., Harrison, T.M., Yun, P., Kidd, W.S.F., Roden, M. and Yuquan, Z., 1995, Thermal evolution of the Gangdese batholith, southern Tibet: A history of episodic unroofing. *Tectonics*, **14**, 223-236.
- Coulon, C., Maluski, H., Bollinger, C. and Wang, S., 1986, Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **79**, 281-302.
- Gansser, A., 1964, *Geology of the Himalayas*. Interscience, London, 289 p.
- George, M., Reddy, S. and Harris, N., 1995, Isotopic constraints on the cooling history of the Nanga Parbat-Hiramosh Massif and Kohistan arc, western Himalaya. *Tectonics*, **14**, 237-252.
- Guillot, S., Hodges, K., Le Fort, P. and Pêcher, A., 1994, New constraints on the age of the Manaslu leucogranite: Evidence for episodic tectonic denudation in the central Himalayas. *Geology*, **22**, 559-562.
- Harrison, T.M., Copeland, P., Kidd, W.S.F. and Lovera, O.M., 1995, Activation of the Nyainqentanghla shear zone: Implication for uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics*, **14**, 658-676.
- Harrison, T.M., Copeland, P., Hall, S.T., Quade, J., Burner, S., Ojha, T.P. and Kidd, S.F., 1993, Isotope preservation of Himalayan/Tibetan uplift, denudation, and climatic histories of two molasse deposits. *Jour. Geol.*, **101**, 157-175.
- Hodges, K.V., Hames, W.E. and Bowring, S.A., 1994, ^{40}Ar - ^{39}Ar age gradients in micas from a high-temperature-low-pressure metamorphic terrain: Evidence for very slow cooling and implication for the interpretation of age spectra. *Geology*, **22**, 55-58.
- Hodges, K.V., Parrish, R.R., Housh, T.B., Lux, D.R., Burchfiel, B.C., Royden, L.H. and Chen, Z., 1992, Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalayan Orogen. *Science*, **258**, 1466-1470.
- Hubbard, M.S. and Harrison, T.M., 1989, ^{40}Ar - ^{39}Ar age constraints on deformation and metamorphism in the main central thrust zone and Tibetan slab, eastern Nepal Himalaya. *Tectonics*, **8**, 865-880.
- Kaneoka, I. and Kono, M., 1981, ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Himalayan rocks from the Mount Everest region. *Jour. Geophys.*, **49**, 207-211.
- 兼岡一郎, 1988, ^{40}Ar - ^{39}Ar 法による年代測定—基礎とその問題点—, 地質学論集, no. 29, 23-36.
- Le Fort, P., 1975, Himalayas, the collided range: present knowledge of the continental arc. *Amer. Jour. Sci.*, **275**, 1-44.
- Macfarlane, A.M., 1993, Chronology of tectonic events in the crystalline core of the Himalaya, Langtang national park, central Nepal. *Tectonics*, **12**, 1004-1025.
- Maluski, H. and Xiao, X., 1988, Argon 39-argon 40 dating of metamorphic and plutonic events in the north and high Himalaya belts (southern Tibet-China). *Tectonics*, **7**, 299-326.
- McDougall, I. and Harrison, T.M., 1988 ed., *Geochronology and thermochronology by the ^{40}Ar - ^{39}Ar method*. Oxford Univ. Press. New York, 212 p.
- McIntyre, G.A., Brooks, C., Compston, W. and Turek, A., 1966, The statistical assessment of Rb-Sr isochrons. *Jour. Geophys. Res.*, **74**, 5459-5468.
- Parrish, R.R. and Hodges, K.V., 1996, Isotope constraints on the age and provenance of the Lesser and Greater Himalayan sequences, Nepalese Himalaya. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **108**, 904-911.
- Richter, F.M., Lovera, O.M., Harrison, T.M. and Copeland, P., 1991, Tibetan tectonics from ^{40}Ar - ^{39}Ar analysis of a single K-feldspar sample. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **105**, 266-278.
- Treloar, P.J., Rex, D.C., Guise, P.G., Coward, M.P., Searle, M.P., Windley, B.F., Petterson, M.G., Jan, M.Q. and Luff, I.W., 1989, K-Ar and Ar-Ar geochronology of the Himalayan collision on NW Pakistan: Constraints on the timing of suturing, deformation, metamorphism and uplift. *Tectonics*, **8**, 881-909.
- Turner, S., Hawkesworth, C., Liu, J., Rogers, N., Kelley, S. and van Calsteren, P., 1993, Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, **364**, 50-54.
- York, D., 1969, Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **5**, 320-324.

(要 旨)

瀧上 豊・金子慶之, 1997, ヒマラヤ変成岩, 花崗岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代における問題点. 地質雑, **103**, 232-239. (Takigami, Y. and Kaneko, Y., 1997, Some problems on ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological studies for Himalayan metamorphic and granitic rocks. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **103**, 232-239.)

いままで得られているネパールヒマラヤの変成岩や花崗岩の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代における過剰アルゴンなどのいろいろな問題点を整理した. そして, それらの問題点をふまえたうえで, 同地域の代表的な ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代を求めた.