

# 東ネパール角閃岩類の角閃石の過剰アルゴン年代

今山武志

岡山理科大学フロンティア理工学研究所

東ネパールヒマラヤ地域において、古原生代角閃岩類に含まれる角閃石の K-Ar 年代測定を実施した。これらの K-Ar 年代は 1727–80 Ma の幅広い値を示し、古原生代の原岩年代がヒマラヤ変成作用によって部分的にリセットした過剰アルゴン年代である。一方、古原生代正片麻岩類の変成ジルコン/モナザイト U-Pb 年代と白雲母 K-Ar 年代は約 20–14 Ma と約 13–7 Ma が報告されており、ヒマラヤ造山運動中の変成・冷却年代を記録する。東ネパール地域の中新生初期における角閃岩相上部–グラニュライト相下部変成作用や角閃石の産状からは、角閃石の過剰アルゴンの原因は、1) K-Ar 系角閃石の高い閉止温度、2) 熱水流体により変質した角閃石の組成変化に関連するかもしれない。

## 1. はじめに

K-Ar 法や Ar-Ar 法は、岩石や鉱物などを対象とした地質年代を求める際の最も有力な方法の一つである。これらの手法では、ある時間 ( $t=0$ ) 以降の試料中のすべての放射性起源  $^{40}\text{Ar}$  は  $^{40}\text{K}$  の壊変により生じた、すなわち過剰  $^{40}\text{Ar}$  は存在しないと一般的に仮定して年代値を求める。一方、K-Ar 系や Ar-Ar 系における過剰  $^{40}\text{Ar}$  の存在は広く知られており、原岩の放射性起源  $^{40}\text{Ar}$ 、鉱物の閉止温度、変形機構や流体の挙動などと合わせて多くの原因が議論されている（例えば、Kelley, 2002; Itaya, 2020）。過剰  $^{40}\text{Ar}$  が多く存在すると、得られる年代値は実際の年代値とかけ離れて古くなるため、その原因を特定することは年代学を地質学に応用する上で本質的問題である。

ヒマラヤ山脈は、約 6000-5000 万年前のインド亜大陸とアジア大陸の衝突によって形成された。一般的に、ヒマラヤ変成岩類は、始新世から中新世にかけて変成作用を広域的に被っている (Hodges, 2000)。高ヒマラヤ帯は、角閃岩相上部からグラニュライト相下部の変成岩類で構成され、主中央衝上断層 (Main Central Thrust, 以下、MCT) 帯に沿って、より低変成度の低ヒマラヤ帯の上に衝上している。高ヒマラヤ帯と MCT 帯の原岩は、砂泥質と花崗岩質変成岩類から主に構成され、それらの層間には角閃岩類が一部分布する。これらの角閃岩類において、角閃石の K-Ar 法や Ar-Ar 法がこれまでに適応されているが、原生代から鮮新世までのバラバラな不一致年代を示す (95-4 Ma: Copeland et al., 1991; 12.5 Ma, Bollinger and Jantos, 2006; 204-21 Ma, Hubbard and Harrison, 1989; 819 Ma, Krummenacher et al., 1966; 695-24 Ma, Krummenacher et

al., 1978; 1492-20 Ma, Metcalf et al., 1993; 445-40 Ma, Sorkhabi et al., 1993)。始新世から鮮新世の年代値は、ヒマラヤ変成・冷却年代あるいは MCT の(再)変形運動の時期と解釈される。一方、始新世初期のインド–アジア大陸衝突より古い年代値は、過剰アルゴン年代として解釈される。しかし、これらの角閃石の過剰アルゴンの原因については議論されていない。

本研究では、東ネパールアルン川地域下流における角閃岩類を対象にして、角閃石の化学組成および K-Ar 年代を分析した結果、過剰アルゴン年代値を得た。それらの結果を報告し、岩石学的観点を踏まえて過剰アルゴン年代の原因について議論を試みる。

## 2. 東ネパールの地質概要

一般的に、ネパールヒマラヤにおける高ヒマラヤ帯の原岩は、新原生代の砂泥質変成岩類と古生代初期の正片麻岩類であり、低ヒマラヤ帯の古原生代の砂泥質変成岩類と古生代初期の正片麻岩類と区分される (Hodges, 2000)。ネパールにおける古原生代花崗岩類は、1.92-1.74 Ga の年代値を示す (Imayama et al., 2019)。一方、東ネパールでは、古原生代岩体は、低ヒマラヤ帯だけでなく高ヒマラヤ帯下部にも分布し、その原岩構成は複雑である (Imayama et al., 2020)。

本研究地域のアルン川地域下流では、低ヒマラヤ帯、MCT 帯と高ヒマラヤ帯変成岩類が分布する。構造的な下位から上位へ向けて逆転温度構造が知られ、変成温度条件は、MCT 帯から高ヒマラヤ帯中部にかけて、670 °C から 760-835 °C まで上昇し、変成圧力は、7-11 kbar 程度である (Imayama et al., 2020)。Corrie et al. (2010) は、アルン地域高ヒマラヤ帯の一部は、エ

**Table 1** K-Ar ages of amphibole from the Main Central Thrust zone (MCTZ) and Higher Himalayan Crystalline Sequence (HHCS) in the Arun area

Sample name	Tectonic unit	Rock type	K (wt.%, 2 $\sigma$ )	Rad. <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-8</sup> ccSTP/g, 2 $\sigma$ )	Non Rad. <sup>40</sup> Ar (%)	K-Ar age (Ma, 2 $\sigma$ )
224-3	MCTZ	amphibolite	0.500 ± 0.010	436.1 ± 4.5	1.9	211.9 ± 4.5
225-2	MCTZ	amphibolite	0.263 ± 0.005	2953.3 ± 39.3	0.4	1726.6 ± 26.7
225-5	MCTZ	amphibolite	0.625 ± 0.013	331.5 ± 3.4	3.0	131.7 ± 2.9
225-8	MCTZ	amphibolite	0.667 ± 0.013	412.2 ± 4.2	3.1	152.6 ± 3.3
227-3A	HHCS	amphibolite	0.327 ± 0.007	999.7 ± 10.1	1.4	653.7 ± 12.3
227-4	HHCS	amphibolite	0.270 ± 0.005	302.1 ± 3.2	2.5	267.5 ± 5.6
301-2	HHCS	amphibolite	0.718 ± 0.014	227.0 ± 2.4	5.2	79.7 ± 1.8
302-1	HHCS	amphibolite	0.363 ± 0.007	653.0 ± 6.8	1.0	412.6 ± 8.3

クロゾイト相 (~670 °C and ≥ 15 kbar) まで達するとした。しかし、これらの苦鉄質岩類中にオンファス輝石は含まれず、アルン地域上流のチベット側のエクロゾイトとは大きく異なるため、本研究地域がエクロゾイト相変成作用まで達したかは不確かである (Imayama et al., 2020)。

本研究地域の高ヒマラヤ帯ミグマタイトは、流体に富む脱水溶融反応 (白雲母+石英+斜長石+水→藍晶石+メルト) や白雲母溶融反応 (白雲母+石英+斜長石→藍晶石+カリ長石+メルト) を被っている。高ヒマラヤ帯下部の変成ジルコンとモナザイト U-Pb 年代は、約 20–14 Ma の変成年代を示す。また、MCT 帯と高ヒマラヤ帯からの白雲母の K-Ar 年代値は、約 13–7 Ma の冷却年代をそれぞれ示す (Imayama et al., 2020)。

### 3. 岩石記載と角閃石組成

分析に用いた試料は、東ネパールの MCT 帯と高ヒマラヤ帯から採取した角閃岩 8 試料である。角閃石組成は、岡山理科大学総合機器センター設置の電子プローブアナライザー (日本電子社製 JSM-8230) により分析した (Imayama et al., 2020)。

MCT 帯の角閃岩 4 試料 (224-3, 225-2, 225-5, 225-8) は、角閃石+黒雲母+斜長石+石英から主に構成され、少量のイルメナイトを含む。角閃石は比較的細粒である。角閃石と黒雲母の伸張方向によって定義される片理面が顕著である。4 試料の角閃石組成は、主にパーガサイトから定角閃石である。ただし、試料 225-2 は、割れ目に沿って変質したチェルマーク角閃石を多く含む (Imayama et al. 2020)。

高ヒマラヤ帯の角閃岩 4 試料 (227-3A, 227-4, 301-2, 302-1) は、角閃石+斜長石+石英±ザクロ石から主に構成され、少量の緑簾石、スフェーン、黒雲母、イルメナイトを含む。角閃石は粗粒である。角閃石や斜

長石の伸張方向によって片理面は定義される。ザクロ石は、角閃石や石英を含む。角閃石の組成は、主に角閃石からチェルマーク角閃石である (Imayama et al. 2020)。

### 4. 角閃石の K-Ar 年代

試料を粉砕し、篩にかけて、粉末を純粋で洗浄して、60°C で乾燥させた。黒雲母や変質鉱物を溶解するために、塩酸処理をした。磁力選別をした後に、ハンドピックで角閃石粒子を分離した。カリウムとアルゴン分析は、岡山理科大学の炎光高度計と質量分析計で実施した。K-Ar 年代の結果を表 1 に示す。

MCT 帯の 4 試料からの角閃石は、1727 Ma から 131 Ma までを示す。K の含有量は、0.26-0.67 wt.% である。試料 225-2 の K の含有量が最も低く、最も年代値が高い。

高ヒマラヤ帯の 4 試料からの角閃石は、654 Ma から 80 Ma までを示す。K の含有量は、0.27-0.72 wt.% である。

### 5. 過剰アルゴンの原因

全ての試料の角閃石 K-Ar 年代値 (1727–80 Ma) は、インドーアジア大陸が衝突した始新世初期より著しく古い。本研究地域の正片麻岩類の原岩年代は古原生代であり、それらと調和的に分布する角閃岩の原岩もおそらく同様に古原生代であると考えられる。したがって、角閃石 K-Ar 年代値は、古原生代の原岩年代がヒマラヤ変成作用によって部分的にリセットした過剰アルゴン年代であることで説明できる。一方、本地域は角閃岩相上部からグラニュライト相下部 (670–835 °C) の変成作用を被っている (Imayama et al., 2020)。一般的な角閃石の K-Ar 系の閉止温度は約 500°C (Harrison et al., 1981) なので、これらのヒマラ

ヤ変成作用は十分に高温である。にもかかわらず、角閃石の K-Ar 年代値が完全にリセットされずに、古い年代値を保持することは注目に値する。

同地域の白雲母の K-Ar 年代値は 13–7 Ma であることから、過剰  $^{40}\text{Ar}$  は角閃石でより保持されやすい傾向がある。白雲母の閉止温度は約 350 °C 程度であると従来はされていたが、最近の研究では少なくとも約 500–550 °C 以上であるとされる (Itaya et al. 2011; Villa et al. 2014)。Dobson et al. (1973) の拡散係数に基づく閉止温度仮説では、K-Ar 系では白雲母より角閃石のほうがより閉鎖系になる温度が高いため、角閃石の K-Ar 系の閉止温度も、従来考えられていた温度よりかなり高温なのかもしれない。しかし、先行研究の角閃石 K-Ar/Ar-Ar 年代も原生代から鮮新世までの幅広い範囲を示すことから、ヒマラヤ角閃岩類の角閃石の不均質な K-Ar 年代分布は、単純に閉止温度が高いことだけでは説明できない。

変成岩は上昇中に変形を被っている。(超) 高压変成岩中のフェンジャイトは、上昇中の変形に伴う動的再結晶や組成変化に伴って、過剰アルゴンを放出する場合がある (Itaya et al., 2011)。本研究試料も、角閃石が伸張して強く変形を被っている。しかし、岩石の変形の程度と過剰 K-Ar 年代分布に直接的な関連性を見出すことはできない。Wartho et al. (2009) は、コヒスタン島弧において、角閃石の過剰アルゴンは緑色片岩相の変質作用の程度と関連があったとした。K-Ar 角閃石年代が最も古い試料 225-2 が、割れ目に沿って変質したチェルマーク角閃石を多く含むことはこの仮説を見かけ上支持する。熱水流体による変質作用に伴う角閃石の組成変化によって、過剰アルゴンが放出されるとすれば、変形作用、特に脆性破壊や岩石–流体反応の理解が過剰アルゴンの原因を特定する鍵になるかもしれない。

いずれにしても何らかの理由により、ヒマラヤ角閃岩類の角閃石は過剰  $^{40}\text{Ar}$  を保持しやすい。今後は、全岩組成や角閃石の微量元素などを測定して、角閃石中の過剰アルゴンの実体を理解する。

## 引用文献

Bollinger, L. and Jantos, E., 2006, Evidence for Mio-Pliocene retrograde monazite in the Lesser Himalaya, far western Nepal. *Eur. Jour. Mineral.*, v. 18, pp. 289–297.

Copeland, P., Harrison, T. M., Hodges, K. V., Maruégol, P., Le Fort, P., and Pêcher, A., 1991. An Early Pliocene disturbance of the Main Central Thrust, central Nepal: implications for Himalayan tectonics. *Jour. Geophys. Res.*, v. 96, pp. 8475–8500.

Corrie S. L., Kohn M. J., and Vervoort, J.D., 2010. Young eclogite from the Greater Himalayan sequence, Arun Valley, eastern Nepal: P-T-t path and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett* 289:406–416.

Dodson, M. H., 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 40, 259–274.

Harrison, T. M., 1981. Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in hornblende. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78, 324–331.

Hodges, K. V., 2000. Overview: tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geol Soc Am Bull* 112:324–350.

Hubbard, M. S., and Harrison, T. M., 1989.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on deformation and metamorphism in the main central thrust zone and Tibetan slab, eastern Nepal Himalaya. *Tectonics* 8:865–880.

Imayama T, Arita K, Fukuyama M, Yi K, and Kawabata R., 2019. 1.74 Ga crustal melting after rifting at the northern Indian margin: investigation of mylonitic orthogneisses in the Kathmandu area, central Nepal. *Int Geol Rev* 61:1207–1221.

Imayama, T., Uehara, S., Sakai, H., Yagi, K., Ikawa, C., and Yi, K., 2020. The absence of high pressure metamorphism in the inverted Barrovian metamorphic sequences of the Arun area, eastern Nepal and its tectonic implication. *Int. J. Earth Sci.* 109, 465–488.

Itaya, T., Tsujimori, T., and Liou, J.G., 2011. Evolution of the Sanbagawa and Shimanto high-pressure belts in SW Japan: Insights from K–Ar (Ar–Ar) geochronology. *J. Asian Earth Sci.*, 42, 1075–1090.

Itaya, T., 2020. K–Ar phengite geochronology of HP–UHP metamorphic rocks –An in–depth review–. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 115, 44–58.

Kelly, S., 2002. Excess argon in K–Ar and Ar–Ar geochronology. *Chem. Geol.*, 188, 1–22.

Krummenacher, D., 1966. Népal Central géochronométrie des series de l’Himalaya. *Bull. Schweiz Mineral Petrogr. Mitteil.*, 46, 43–54.

Krummenacher, D., Basset, A. M., Kingery, F. A., and Layne, H. F., 1978. Petrology, metamorphism and K/Ar age determinations in Eastern Nepal. In: Saklani PS (ed.) *Tectonic Geology of the Himalaya, Today and Tomorrow’s Printers and Publishers, New Delhi.*

Metcalfé, R.P., 1993. Pressure, temperature and time constraints on metamorphism across the main central thrust zone and high Himalayan slab in the Garhwal Himalaya. In: Treloar, P.J., Searle, M.P. (Eds.), *Himalayan Tectonics*, *Geol. Soci. London Spec. Pub.* 74, 485–509.

Sorkhabi, R. B., Jain, A. K., Itaya, T., Nishimura, S., Manickavasagam, Rm., and Lal, N., 1993. K/Ar cooling ages from Zaskar Himalaya: implications for the tectonics and exhumation of Higher Himalayan metamorphic complex. *Current Science*, 65(9), 687–693.

Villa I. M., Bucher, S., Bousquet, R., Kleinhans, I. C., Schmid, S. M., 2014. Dating polygenetic metamorphic assemblages along a transect across the western Alps. *J Petrol* 55:803–830.

Wartho, J.-A., Rex, D.D., and Guise, P.G., 1996. Excess argon in amphiboles linked to greenschist facies alteration in Kamila amphibolite belt, Kohistan Island arc system,

northern Pakistan: insights from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  step-heating and acid leaching experiments. *Geol. Mag.* 133, 595– 609.