

私が見てきた熱年代学の変遷

Development of thermochronology in my view

田上高広*

Takahiro Tagami *

*: 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

熱年代学とは、放射年代測定の手法と鉱物ごとに被熱応答性が異なることを利用して、母岩の熱史を定量的に復元する学問分野である。1960年代には、地質学的加熱イベントによって放射年代時計がリセットされる際に、応答が有意に異なることが明らかになっていた (Hart, 1964)。一般に、親核種よりも娘核種の方が鉱物中の熱拡散速度が速いため、放射年代の被熱応答性は娘核種の熱拡散係数により支配される。母岩の温度上昇に伴って、娘核種が鉱物から熱拡散により散逸すると、放射年代測定の必要条件である閉鎖系が破れて開放系となってしまう。母岩の温度が下降すると、散逸は止まり閉鎖系が保たれるようになる。この境目となる温度は閉鎖温度 (Closure temperature; または Blocking temperature) と呼ばれ、母岩の冷却過程を双曲線関数で近似することにより初めて定式化された (Dodson, 1973)。

このブレイクスルーに続く1970年代から80年代において、ヒマラヤ・アルプスなどの世界の造山帯を舞台に、山脈の隆起—削剥—冷却を定量的に復元する研究が大きく花開いた (Wagner et al., 1977; Zeitler et al., 1982)。1970年頃に確立されたプレートテクトニクス理論により、プレート収束域である変動帯の大枠は明らかになっており、そこに長い時間スケールの変動現象を定量的に復元できる新たなツールがもたらされた。熱年代学の黄金時代の始まりであり、その中心

となった手法が Ar/Ar 法とフィッショントラック (FT) 法であった。

1984年夏に米国ニューヨーク州トロイ市において、第4回国際 FT 年代測定ワークショップが開催されたが、そこでも研究動向の中心は熱史研究であり

“Thermochronology (熱年代学)” という言葉がこの頃から広がり始めた。その中心となったのがオーストラリア・メルボルン大学の一連の研究であり、Andy Gleadow による40分に及ぶ基調講演において、FT年代だけでなく FT 長測定の重要性と石油堆積盆研究の新展開が紹介された。この頃から1990年代にかけて、FT 長測定方法・FT 熱アニーリング関数・熱史逆解析プログラムなど、現在につながる FT 熱年代学の基盤が整えられていった。1988年夏にフランス・ブザンソンにおいて開催された第6回国際 FT 年代測定ワークショップにおいては、いくつかのグループから FT 長測定方法・FT 熱アニーリング関数についての発表があり、特に Paul Green を中心とするメルボルン大学の研究は、その後の熱史定量モデリングの先駆けとなった (Green et al., 1989; Crowley, 1985)。この流れは、1990年代に熱史逆解析の実用化として結実していく (Lutz and Omar, 1991; Gallagher, 1995)。

その頃、もう一つの大きなうねりが希ガス年代の分野からもたらされた。FT 法よりさらに閉鎖温度の低い (U-Th)/He 熱年代学の誕生である。(U-Th)/He 法は、最初に試された放射年代測定法であ

ったが、地質学的に意味がない異常に若い年代を与えたため、使えないものとして長く忘れられていた (Hurley, 1954) . 1980年代に入り、オーストラリア国立大学の研究グループにより閉鎖温度の低い手法として再評価され (Zeitler et al., 1987) , 1990年代以降カリフォルニア工科大学の Ken Farley 達によって拡散過程の研究や天然試料への適用が一通り行われ、熱年代学に広く用いられ始めた

(Farley, 2002) . 特に医療用の白金マイクロパケットを用いた巧妙なレーザー加熱法により、単結晶レベルでの熱年代測定が可能となった (House et al., 2000) . 当時のカリフォルニア工科大学は世界から熱年代関係者が集う新たなホットスポットとなっており、そこから現在の(U-Th)/He 熱年代学を牽引する若い研究者達が世界へと羽ばたいて行った。それは同時に、FT 熱年代学との合わせ技で、

「低温領域の熱年代学」という新しい研究ジャンルが確立されたことも意味した。結果、2000年頃から、アパタイトとジルコンの(U-Th)/He, FT, (U-Th)/Pb法を組み合わせる分析が、熱年代学的応用研究の基本ルーチンとなった。2000年夏 (@南半球) にオーストラリア・ローンにおいて開催された第9回 FT 年代測定 & 熱年代学国際会議は、その熱気に包まれ大変暑い (そして、大陸中央の砂漠地帯からローンに熱波が押し寄せてきて、実際猛烈に暑い) 1週間であった。

その後、2000年代において重大な論点となったのが、古いアパタイトに適用する際に見出された (U-Th)/He 年代と FT 年代の逆転現象とその要因であった。当時考えられていた閉鎖温度は、FT が約 100°C, (U-Th)/He が約 70°C であったので、岩石が通常の地質学的な冷却史を反映する場合 FT 年代の方が古くはるはずである。ところが、岩石の年代が古くなるに従い、両者は接近し逆転することが広く見出され始めた (Hendriks and Redfield, 2005; Green et al., 2006) . どちらかの (または両方の) 熱年代システムのどこかに不具合があるはずなので、両

手法間で論争が加熱した。決め手となったのは、石油堆積盆解析で広く用いられるビトリナイト反射率などの被熱指標で、それらとの比較から(U-Th)/He 年代側に問題があることが明らかになった。つまり、(U-Th)/He 法の閉鎖温度は、用いる鉱物の年代 (正確には放射線による被曝量) に応じて変化することになる。したがって、その後の応用研究では、この点の評価が熱史解析において不可欠になっている (Guenther et al., 2013) .

このように、2000年頃に「低温領域の熱年代学」が脚光を浴びるに伴い、世界の大地帯での隆起—削剥—冷却履歴の研究がさらに進展し、大枠が完成されることとなった。熱年代学という学問領域は見事に金字塔を打ち立てたのであるが、研究サイクルの必然的帰結として、基盤岩の解析においては最先端研究の余地が次第に小さくなっていく。変わって、地球環境問題のクローズアップも背景として、徐々に研究の重心となったのが、地球表層での物質移動の指標となる熱年代シグナルの利用、いわゆる、

「Detrital thermochronology」である

(Bernet and Spiegel, 2004; Malusa and Fitzgerald, 2019) . 堆積物中の鉱物粒子ごとの年代—熱年代情報から、供給源となる後背地の隆起—削剥—冷却履歴に加えて、物質供給/移動に関する情報も得られるため、他の堆積学的/地球化学的指標と合わせて広く用いられている。

熱年代学のもう一つの方向性としては、局所的な熱現象の解析が挙げられる。従来から、マグマ貫入による基盤岩への接触型変成作用を伴う熱影響の評価に、熱年代学は広く用いられてきた

(Hart, 1964; Calk and Naeser, 1973) . 年代測定技術の進展に伴う単粒子年代測定の普及により、さらに高い空間分解能が必要な熱現象にも適用が試みられるようになってきた。その代表が断層帯の熱年代学である (Tagami, 2012, 2019) . 断層面における剪断変形による摩擦発熱や、断層帯の高い浸透率を持つ領域における熱水移動を、母岩の被熱イベントとして

熱年代学的に検出し解析することが可能となった。地震テクトニクスへの貢献のみならず、地球環境問題に関連した、地球表層の水熱輸送への関心もあり、難易度の高い課題ではあるが様々な関連研究が進められている。

さらに、2010年代に入って、熱年代学発展の新たな光が、ルミネッセンス年代測定業界からもたらされた。OSL（光励起ルミネッセンス）年代法による「超低温」領域熱年代学の誕生である

(Herman and King, 2018)。大陸地殻-大陸地殻衝突による超高速造山帯において、閉鎖温度がとても低く（約50°C以下）しかも若い年代領域に適した手法が成功を収めたことにより、地形発達を含む地殻浅部領域の解析が視野に入ってきた。これに続いて、ESR（電子スピン共鳴）法も用いることにより、より長い時間スケールの解析も可能となってきた（King et al., 2020）。加えて、モナザイトを用いたFT法も試みられてきており、熱年代学の新しいうねりとなることが期待される（Jones et al., 2023）。

引用文献

- Bernet, M. and Spiegel, C., 2004, Introduction: Detrital thermochronology. In *Detrital thermochronology: Provenance analysis, exhumation, and landscape evolution of mountain belts*, eds. Bernet, M. and Spiegel, C., pp. 1–6. Geological Society of America, Special Paper.
- Calk, L. C. and Naeser, C. W., 1973, The thermal effect of a basalt intrusion on fission tracks in quartz monzonite. *The Journal of Geology*, **81**, 189–198.
- Crowley, K. D., 1985, Thermal significance of fission-track length distributions. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, **10**, 311–322.
- Dodson, M. H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **40**, 259–274.
- Farley, K. A., 2002, (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **47**, 819–844.
- Gallagher, K., 1995, Evolving temperature histories from apatite fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, **136**, 421–435.
- Green, P. F., Crowhurst, P. V., Duddy, I. R., Japsen, P., Holford, S. P., 2006, Conflicting (U-Th)/He and fission track ages in apatite: enhanced He retention, not anomalous annealing behaviour. *Earth and Planetary Science Letters*, **250**, 407–427.
- Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., Hegarty, K. A., Gleadow, A. W., Lovering, J. F., 1989, Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, **79**, 155–182.
- Guenther, W. R., Reiners, P. W., Ketcham, R. A., Nasdala, L., Giester, G., 2013, Helium diffusion in natural zircon: Radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology. *American Journal of Science*, **313**, 145–198.
- Hart, S. R., 1964, The petrology and isotopic-mineral age relations of a contact zone in the Front Range, Colorado. *The Journal of Geology*, **72**, 493–525.
- Hendriks, B. W. H., Redfield, T. F., 2005, Apatite fission track and (U-Th)/He data from Fennoscandia: An example of underestimation of fission track annealing in apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, **236**, 443–458.
- Herman, F. and King, G. E., 2018, Luminescence thermochronometry: Investigating the link between mountain erosion, tectonics and climate. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, **14**, 33–38.
- House, M. A., Farley, K. A., Stockli, D., 2000, Helium chronometry of apatite and titanite using Nd-YAG laser heating. *Earth and Planetary Science Letters*, **183**, 365–368.

- Hurley P.M., 1954, The helium age method and the distribution and migration of helium in rocks. In *Nuclear Geology*, ed. Faul, H., pp. 301–329. Wiley and Sons, New York.
- King, G. E., Tsukamoto, S., Herman, F., Biswas, R. H., Sueoka, S., Tagami, T., 2020, Electron spin resonance (ESR) thermochronometry of the Hida range of the Japanese Alps: validation and future potential. *Geochronology*, **2**, 1–15.
- Jones, S., Kohn, B., Gleadow, A., Skrzypek, E., Tagami, T., 2023, Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. *Tectonophysics*, **864**, 229998.
- Lutz, T. M. and Omar, G., 1991, An inverse method of modeling thermal histories from apatite fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 181–195.
- Malusà, M. G. and Fitzgerald, P. G., 2019, Application of Thermochronology to Geologic Problems: Bedrock and Detrital Approaches. In *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, eds. Malusà, M. and Fitzgerald, P. G., pp. 191–209. Cham: Springer International Publishing.
- Tagami, T., 2012, Thermochronological investigation of fault zones. *Tectonophysics*, **538–540**, 67–85.
- Tagami, T., 2019, Application of fission-track thermochronology to understand fault zones. In *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, eds. Malusà, M. and Fitzgerald, P. G., pp. 221–233. Cham: Springer International Publishing.
- Wagner, G.A., Reimer, G.M., Jäger, E., 1977, Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alps. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, **30**, 1–27.
- Zeitler, P. K., Herczeg, A. L., McDougall, I., Honda, M., 1987, U-Th-He dating of apatite: A potential thermochronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 2865–2868.
- Zeitler, P. K., Johnson, N. M., Naeser, C. W., Tahirkheli, R. A., 1982, Fission-track evidence for Quaternary uplift of the Nanga Parbat region, Pakistan. *Nature*, **298**, 255–257.