

年代測定と安定同位体から見る地球の気候変遷

田上高広*

1. 放射年代測定法の概要と最近の進展

放射性核種を用いた地球惑星物質の年代測定は、原理の発見から100年あまりの時間が経過し、数多くの手法が開発され、岩石を初めとする様々な地球物質に広く応用されてきた。現在、地質学的な時間スケールで用いられている主要な年代測定法の概要を表1に示す。比較のために、気候変遷の研究に広く用いられているU-Th法と¹⁴C法も併せて示した。

地質学的時間スケールの年代測定法において放射壊変の様式は多様であるが、共通点として、半減期が10億年程度以上と長いことがあげられる。このため、測定に適した年代範囲には下限が存在し、最も若いK-Ar (Ar/Ar)法でも1万年程度までと言うのが現状である。一般的には、より古い岩石ほど娘核種の蓄積量が多い

ため、より微量な物質に対して、より高精度な測定が可能となる。これに対し、U-Th法と¹⁴C法では半減期が千年~10万年オーダーと短いため、測定に適した年代範囲には上限が存在し、それぞれ、50万年と3万年程度である(後者については、近年の水月湖などでの精力的な研究から、更に古い年代まで伸ばす努力が進められている)。

地質学的時間スケールの年代測定法において近年進展が著しい分野としては、K-Ar (Ar/Ar)法を用いた若い火山岩類の年代測定と、U-Thを親核種とする一連の年代測定法による岩石の精密年代測定および温度履歴解析(熱年代学)があげられる。従来、K-Ar (Ar/Ar)法では100万年より若い年代測定は難しいとされ、¹⁴C法との間の年代ギャップが第四紀編年の大

表1 地球科学に広く用いられる年代測定法一覧。気候変遷の研究に有用なU-Th法と¹⁴C法も示す。

方法	核種(親-娘)	壊変様式	半減期(年)	試料	年代範囲(年)
K-Ar法 (Ar/Ar法)	⁴⁰ K - ⁴⁰ Ar	電子捕獲	1.25×10^9	雲母、角閃石、カリ長石、火山岩	$> 10^4$
Rb-Sr法	⁸⁷ Rb - ⁸⁷ Sr	β壊変	4.88×10^{10}	雲母、カリ長石、深成岩	$> 10^7$
U, Th-Pb法	²³⁸ U - ²⁰⁶ Pb	壊変系列(α, β)	4.47×10^9	ジルコン、モナズ石	$> 10^6$
	²³⁵ U - ²⁰⁷ Pb	壊変系列(α, β)	7.04×10^8		
	²³² Th - ²⁰⁸ Pb	壊変系列(α, β)	1.40×10^{10}		
Sm-Nd法	¹⁴⁷ Sm - ¹⁴³ Nd	α壊変	1.06×10^{11}	火山岩、深成岩	$> 10^9$
U, Th-He法	²³⁸ U - ⁴ He (×8)	壊変系列(α, β)	4.47×10^9	アパタイト、ジルコン	$> 10^6$
	²³⁵ U - ⁴ He (×7)	壊変系列(α, β)	7.04×10^8		
	²³² Th - ⁴ He (×6)	壊変系列(α, β)	1.40×10^{10}		
フィッション・トラック法	²³⁸ U - 核分裂飛跡	自発核分裂	(4.47×10^9)	アパタイト、ジルコン	$> 10^6$
U-Th法	²³⁴ U - ²³⁰ Th	α壊変	2.48×10^5	炭酸塩(方解石等)	$< 5 \times 10^5$
¹⁴ C法	¹⁴ C - ¹⁴ N	β壊変	5730	木片、貝殻、骨	$< 3 \times 10^4$

*京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻教授

きな問題点とみなされていたことがあった。しかし、近年の分析技術と方法論の進展により、1万年オーダーの年代測定が可能となってきたため、火山噴火の歴史記録や¹⁴C法との直接比較も可能となってきている (Renne et al., 1997; Matsumoto and Kobayashi, 1995; 柳・板谷, 2013)。

U, Thを用いた精密年代測定としては、オーストラリア国立大学が牽引した、SHRIMPを用いたジルコンの高精度分析が1990年頃から世界を席巻した (Compston et al., 1985)。ジルコンの鉱物断面の成長縞を観察しながら、U-Pb年代の局所分析を行うことにより、鉱物の成長の時期を正確に決定することが出来るようになった。ジルコンは他の鉱物に比べて風化変質に強いことから、火山灰鍵層などの正確な

年代測定がより広範に行うことが可能になった。また、ジルコンのU-Pb年代は結晶の晶出(成長)の時期を与えるため、火山の噴出年代を与えるK-Ar (Ar/Ar)法などとの併用により、マグマ溜まりの中での鉱物の滞留時間に対しても新たな情報が得られることになった (Schmitt, 2011)。

熱年代学分野では、フィッシュトラック (FT)法と(U-Th)/He法による低温領域(約50-350℃)での温度履歴解析が大きく進んだ。とりわけ、アパタイトを用いた両手法による解析により、他の手法では解析が困難な100℃付近での解析がテクトニクス/地形学などの分野に大きなインパクトを与えた。これにより、現在の山岳や盆地の形成に至る地球表層の上下運動が定量的に復元できるようになり、地殻表層

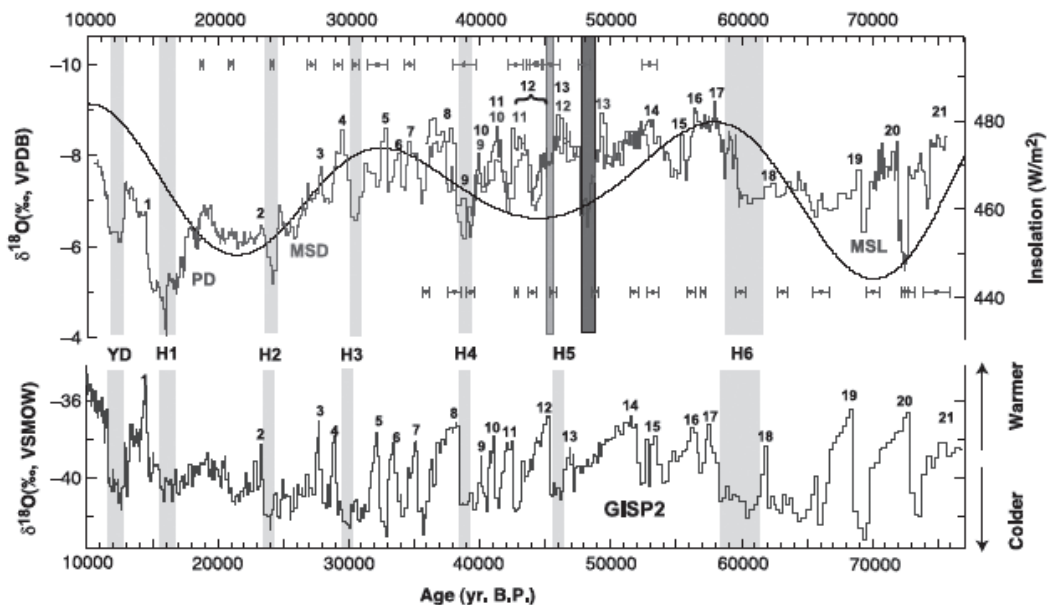


図1 中国 Hulu の鍾乳石とグリーンランドの水床コア (GISP2) の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) 時系列データ比較 (Wang et al., 2001)。鍾乳石の $\delta^{18}\text{O}$ 変動 (上図) は約7万年間の東アジアモンスーン変動を反映していると解釈され、 $\delta^{18}\text{O}$ の減少がモンスーン強化 (多雨) を示す。北緯25度における夏の日射量変動 (曲線) と類似性が認められる。水床コアの $\delta^{18}\text{O}$ 変動 (下図) はグリーンランドの気温変化を反映していると解釈され、 $\delta^{18}\text{O}$ の増加が温度上昇を示す。鍾乳石と水床コアの $\delta^{18}\text{O}$ 時系列に対応が見られることから、東アジアのモンスーン変動がグリーンランドの気温と関連していることが示唆される。

の変動像が一新されてきている。詳細は最近のレビュー論文などを参照されたい (Reiners et al., 2005; Tagami et al., 2012; 末岡他, 2014)。

2. 安定同位体と地球システム

地球は約 46 億年前に形成されてから絶えず変動してきており、地球システム内の物質移動の結果、さまざまな同位体分別が起こってきた。とりわけ、地球表層で起こる気圏・水圏・地殻浅部での相互作用を含む変動については、軽元素の安定同位体を用いた研究がその実態解明に大きく貢献してきた。

気候変遷の研究において重要な鍵となるのが、「水惑星地球」における天然水の挙動である。他の太陽系内惑星と異なり、地球では水が氷・水蒸気を含めた三相で存在し、気候変遷に伴う相変化により有意な同位体分別を生じる。そのため、特に酸素と水素の同位体存在度は、さまざまな時空間スケールにおける気候変遷の有効な指標となる。

現在の地球における降水の同位体比は、緯度・高度・海岸からの距離などに応じて系統的な空間変化を示すことが知られており、また、同一地点でも降水量・気温・気圧などの気象・気候要因を反映して変化する。陸域の降水は表層水または地下水として大部分は海洋に流れこむが、降水時の同位体情報は基本的には保持されるため水循環研究において有用なトレーサーとなっている。加えて、寒冷地での降雪が氷床として保存されている場合、過去の気候情報が安定同位体比などに残されているため、氷床コアの解析から長期間の気候変遷を読み解くことが出来る (図 1)。

気候変遷の研究においても一つの重要な鍵が、海水などから析出する炭酸塩である。サンゴや有孔虫などの炭酸塩硬組織の酸素同位体比

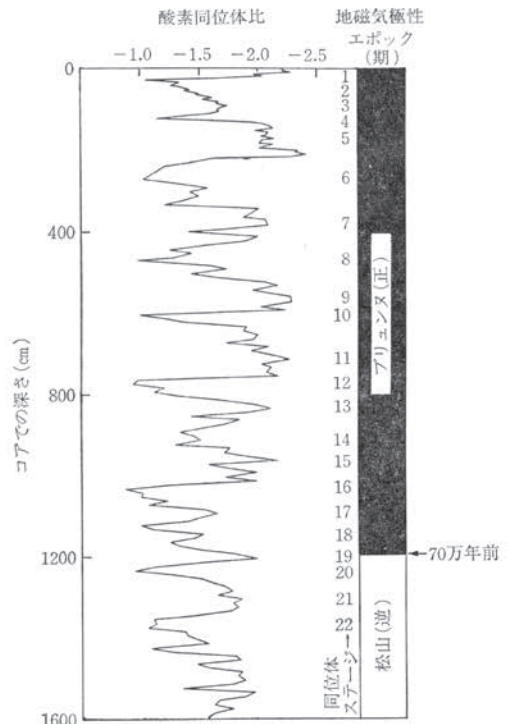


図 2 太平洋の深海底から採取された堆積物コア中に含まれる浮遊性有孔虫の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) 時系列データ (Shackleton and Opdyke, 1973; インブリー・インブリー, 1982 より)。 $\delta^{18}\text{O}$ の特徴的な増減に対して同位体ステージ (Marine Isotope Stage; MIS) が認定されており、ステージ 19 が地磁気極性の反転境界 (松山-ブリュンヌ境界) に当たることが確立された (当時 70 万年前とされた境界の年代が、最新の年代層序区分では 78 万年前に修正されている)。 $\delta^{18}\text{O}$ の変化は主に氷期-間氷期の海水準変動を反映しており、かつて 4 回あったと信じられていた氷河時代が、第四紀後半には約 10 万年周期で定期的に存在したことが明らかになった。

($\delta^{18}\text{O}$) は、それらが同位体平衡下で生成される場合、周囲にある海水の温度と $\delta^{18}\text{O}$ 値に依存して系統的に変化する。従って、海洋において形成された炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ 分析から、過去の水温や陸域氷床量を推定することが出来る。この方法を用いて、深海底の堆積物のボーリング試料を分析することにより、第四紀における氷期・間氷期サイクルが明らかにされた (図 2)。

3. 気候変遷研究の最近の進展

気候変遷の研究は、我々を育む地球の成り立ちを知りたいという知的好奇心によって長年進められてきた。しかし近年、地球環境問題の深刻化に伴い、地球の将来予測という観点から新たな局面を迎えている。将来の温暖化や水循環の変化を予測するために、全球の気候モデルを用いた数値シミュレーション研究が現在盛んに行われているが、それらのモデルをより良くチューニングし予測の信頼度を向上させるためには、過去 2000 年程度に渡る古気候代替指標（プロキシ）による高時間分解能な古気候復元が欠かせない。

従来古気候の復元には、深海底・湖底堆積物、氷床・氷河、サンゴ、樹木年輪、鍾乳石などのプロキシ解析が広く行われてきた。これらは、時空間的な広がりや分解能においてそれぞれ特徴を持ち相互補完的であるが、陸域の水循環の高時間分解能な指標という視点から、鍾乳石と樹木の安定同位体分析が最近大きな注目を集めている。

3-1. 鍾乳石を用いた気候変遷復元

鍾乳石は石灰岩洞窟内において、滴下水からの CO₂ の脱ガスに伴う炭酸塩析出により形成される。滴下水の主な起源は、降水が地表面から土壌・岩盤を通過し洞窟内にたどり着く浸透水である。降水は土壌中の CO₂ を吸収し弱酸性となった後、石灰岩の岩盤（母岩）と反応しながら浸透し、炭酸カルシウムに飽和した状態に近づいていく。したがって、鍾乳石には降水の酸素同位体組成や土壌の炭素同位体組成が記録されるため、過去の気象・気候条件や植生を復元することが出来る。分析手順としては、採取した鍾乳石を半割し適宜薄片などを作成した後、成長縞の観察・計数と U/Th 年代測定を

行い、鍾乳石成長の年代モデルを確立する。次に、成長軸に沿って試料を削り出し、質量分析計を用いて酸素・炭素などの安定同位体分析を行い、時系列変動を復元する。以上に関する詳細については、最近のレビュー論文を参照されたい（Fairchild et al., 2006；狩野, 2011；渡邊他, 2013）。

図 1 に、中国 Hulu の鍾乳石から得られた酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の時系列データを示す (Wang et al., 2001)。地球に降り注ぐ太陽からの放射量（日射量）は、地球の公転・自転軌道の揺らぎが原因となり様々な周期性を持って変動する（ミランコビッチ・サイクルと呼ばれる）。地球上のある地点における日射量の年間積分値は一定で経年変化はないが、ある季節に限ると日射量は年々変動を示すため、アルベドフィードバックなどが起因し、長時間スケールの気候変動を起こすと考えられている。図 1 には、北緯 25 度における夏の日射量変動（曲線）も示されており、鍾乳石の $\delta^{18}\text{O}$ 時系列データと類似性が認められる。また、グリーンランドの氷床コアから得られた $\delta^{18}\text{O}$ 時系列データ（図 1）とも対応が見られることから、東アジアのモンスーン変動がグリーンランドの気温と関連していることが示唆された。この研究は更に古い時代までさかのぼって進められた結果、夏の日射量変動と東アジアモンスーン変動との高い相関性が過去 22 万年間にわたって明らかになった (Wang et al., 2008)。

3-2. 樹木を用いた気候変遷復元

樹木を記録媒体とした気候変遷の復元には、従来、年輪幅の経年変化が広く用いられてきた。一般に樹木年輪の幅（即ち樹木の肥大成長量）は成長期の平均気温と正の相関を持つことが知られており、ヨーロッパと北米地域を中心に過

去一万年程度の古気温の復元に広く用いられてきた。最近では、上述の気候モデルのチューニングを視野に、過去 2000 年程度の気温変動が東アジアを初め世界の各地域で詳細に取りまとめられた (Cook et al., 2012; PAGES 2k Network, 2013)。

これに加えて、樹木の安定同位体比が成長環境の相対湿度・降水量を反映することから、陸域の水循環に関わる有力な古気候プロキシとして近年用いられ始めている。樹木は、主に降水起源の土壌水を摂取し葉に輸送した後、葉内において光合成により糖を合成し樹体の肥大成長をもたらす。葉内水は気孔を介して葉外の大気と水蒸気のやりとりを行うが、大気の相対湿度が低いほど葉からの蒸散は促進されるため、より大きな同位体分別を起こした水が樹体成長に寄与することになる。したがって、樹木試料の酸素同位体などの分析から、降水の同位体情報 (気団・降水量など) および大気の相対湿度を復元することができる。この研究は現在世界的に盛んになってきているが、日本においても地球研の中塚を中心として非常に精力的な研究が進行しており、今後の研究展開が大変期待される (例えば Sano et al., 2012)。方法論の詳細については、中塚 (2007, 2010) などを参照されたい。

参考文献

Compston, W., Froude, D.O., Ireland, T.R., Kinny, P.D., Williams, I.S., Williams, I.R. and Myers, J.S., 1985. The age of (a tiny part of) the Australian continent. *Nature*, 317, 559-560.

Cook, E.R., Krusic, P.J., Anchukaitis, K.J., Buckley, B.M., Nakatsuka, T., Sano, M., PAGES Asia2K Members, 2012. Tree-ring

reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1611-x.

Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F., E.I.M.F., 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth Science Reviews*, 75, 105-153.

インブリー, J., インブリー, K. P., 1982. 氷河時代の謎を解く. 岩波現代選書.

狩野彰宏, 2011. 石筍古気候学の原理と展開. *地質学雑誌*, 118, 157-171.

Matsumoto A., Kobayashi T., 1995. K-Ar age determination of late Quaternary volcanic rocks using the 'mass fractionation correction procedure': application to the Younger Ontake Volcano, central Japan, *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 125, 123-135.

中塚武, 2007. 樹木年輪セルロースの酸素同位体比による古気候の復元を目指して. *低温科学*, 65: 49-56.

中塚武, 2010. 気候と社会の歴史を診る 樹木年輪の酸素同位体からの解読. 安定同位体というメガネ (和田英太郎・植松幸弘編), 地球研業書, 37-58.

PAGES 2k Network, 2013. Continental-scale Temperature Variability During the Past Two Millennia. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo1797.

Reiners, P. W., Ehlers, T. A., Zeitler, P. K., 2005. Past, present, and future of thermochronology. *Rev. Mineral. Geochem.*, 58, 1-18.

- Renne, P.R., Sharp, W.D., Deino, A.L., Orsi, G., Civetta, L., 1997. Ar-40/Ar-39 dating into the historical realm: Calibration against Pliny the Younger. *Science*, 277, 1279-1280.
- 柳善榮・板谷徹丸, 2013. アルゴン同位体質量分別補正 K-Ar 年代学. 月刊地球号外, 62, 160-167.
- Sano, M., Xu, C., Nakatsuka, T., 2012. A 300-year Vietnam hydroclimate and ENSO variability record reconstructed from tree ring $\delta^{18}\text{O}$. *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2012JD017749.
- Schmitt, A. K., 2011. Uranium series accessory crystal dating of magmatic processes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 321-349.
- Shackleton, N. J., Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 and 10^6 years scale. *Quat. Res.*, 3, 39-55.
- 末岡茂・堤浩之・田上高広, 2014. 低温領域の熱年代学の発展と日本の山地の隆起・削剥史研究への応用. 地球科学, 印刷中.
- Tagami, T., 2012. Thermochronological investigation of fault zones. (Review article) *Tectonophysics*, 538-540, 67-85, doi:10.1016/j.tecto.2012.01.032.
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z. S., Wu, J. Y., Shen, C. -C., Dorale, J. A., 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294, 2345-2348.
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., Kong, X., Shao, X., Chen, S., Wu, J., Jiang, X., Wang, X., An, Z., 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451, 1090-1093, doi:10.1038/nature06692.
- 渡邊裕美子・中井俊一・田上高広, 2013. 鍾乳石のウラン系列放射非平衡年代測定と古気候研究への応用. 月刊地球, 62, 153-158.