

地質調査所における地質年代測定研究

柴田 賢（地質調査所）

要旨

地質調査所における地質年代測定法の開発の歴史を紹介した。K-Ar 法については初期のケンブリッジ大学における測定技術の導入から高精度の測定装置までの発展過程、日本の花崗岩の広域的な年代測定などの成果、Rb-Sr 法については日本最古の岩石の発見などの成果を紹介した。また年代測定法の主流になりつつある U-Pb 法にもふれた。

1. はじめに

地球の年齢はどれくらいであろうか？地球上の岩石はいつごろできたものであろうか？素朴ではあるが興味深いこれらの質問は、地質学者ならずともだれもが一度はいただいたことがある。このような質問に答える学問が地質年代学（Geochronology, 地球年代学ともいう）である。古くから化石や地層の重なり方を調べることにより、地球の年表にあたる地質系統（古生代、カンブリア紀など）が組み立てられてきた。地質系統は地球上の岩石や地層の新旧関係を示すいわば相対的な物さし（尺度）である。しかし、この物さしは岩石や地層が今から何年前にできたものかを教えてはくれない。岩石の年齢を年数という物さしではかることができるようになったのは、19 世紀末の放射能の発見に始まるといってよい。天然の放射性同位体を利用して岩石ができてからの年数を求める方法を、地質年代測定法といい、この方法で求められた年齢を放射年代あるいは同位体年代という。

私は 1956 年に地質調査所に入所して、主に石油、天然ガスの地球化学的研究に従事していたが、ある時から地質年代学を研究したいという衝動に駆られて留学先を探していた。そして運よく British Council の留学試験に合格した。当時イギリスで地質年代学の研究が行われていたのはケンブリッジ大学とオックスフォード大学だけであり、ケンブリッジ大学に応募して入学が認められた。1960 年 7 月、私は British Council 奨学生として仲間の 10 名と共に横浜港を出港した。40 日の長い船旅を終えて 8 月末秋風の漂うロンドンに到着した。ロンドンでの研修を終えたのち 9 月半ばに留学先のケンブリッジに向かった。私の所属はケンブリッジ大学地球物理学教室 (Department of Geodesy and Geophysics) で、ケンブリッジ市街から 2 キロほど離れたのどかな田園地帯にあり、建物は Madingley Rise といって元はケンブリッジ大学の Newall 教授の邸宅であった（次ページ写真左）。Newall 教授は天文学者で地球物理学教室の設立にも貢献した。

当時地球物理学教室では Bullard 卿が中心となって海洋底の地磁気や熱流量の研究を盛んに行っていた。カナダ、インド、ニュージーランドなど数か国から学生が集まり活気にあふれていた。あの有名な Vine と Matthews による海洋底拡大説の研究もその頃ここで

われていた． Bullard 卿は地球磁場の原因を説明する有力な説であるダイナモ理論を提唱したことで有名であり， コンピュータを使って古大陸の復元を試みるなど， すぐれたアイデアの持ち主であった． 私は地質調査所を休職してケンブリッジ大学の大学院学生

（Research student）となり， あわせて Trinity College（写真右）に所属することとなった． 私の地質年代学の研究はケンブリッジ大学で始まったといってよい． ところでケンブリッジ大学とカレッジは独特の制度を有しているので， 柴田（2001）によって詳しく解説する．



2．ケンブリッジ大学

ケンブリッジ大学が世界的に特異な大学であるのは， オックスフォード大学と共に創立当初から現在までカレッジ制度を維持してきたという点であろう． 厳密には， ケンブリッジ大学の創立は 1209 年， 最初のカレッジ（ピーターハウス・カレッジ）が設立されたのが 1284 年であるから， カレッジの方が少し後である． ケンブリッジ大学（The University of Cambridge）の構成は日本の大学と同じで， 学部， 学科をもち， 教官（教授， 助教授， 講師）がいて， 講義を受け， 実験・実習をする所である． これに対して， カレッジ（College, イギリスでの発音はコリッジに近いが， ここでは慣習に従ってカレッジと書く）は学生が宿泊し， 勉学し， 食事をし， 礼拝をするところである． 従ってカレッジには必ず宿舎と食堂とチャペルがある． 学生は学期中の一定期間（約 170 日）カレッジに宿泊することが義務づけられている． カレッジの教官はフェロー（Fellow）と呼ばれ， 昔は学生と生活を共にしていたが， 現在は教官の多くは自宅に住んでいる． このように， ケンブリッジでは大学とカレッジとが二重構造をなしていて， 教官も学生も原則としてどこかのカレッジに所属しなければならない． 入学試験もカレッジごとに実施され， カレッジに入学すれば自動的にケンブリッジ大学の学生となる． また大学は国立であるのに対して， カレッジは独立採算制をとる私立であり， 人事や予算などについて完全に自主性を保っている．

ケンブリッジ大学には現在 31 のカレッジがある． これらのカレッジはそれぞれ異なった歴史や特徴や校風をもっている． 3 つの女子校を除いて男女共学であるが， 私がいた当時のカレッジはほとんどが男子校であった． また大学院学生しか受け入れないカレッジも

ある。カレッジの長にはカレッジ毎に独特の名前が付いている。Trinity College の場合はマスター (Master) と呼ばれている。他に, President, Principal, Mistress, Provost, Warden といった名前と呼ばれているが, いずれの場合もカレッジの長はカレッジに関係のある有名人になることが多い。Trinity College と Churchill College のマスターは形式的ではあるが, 女王によって任命される。

ケンブリッジ大学のカレッジのもう一つの特徴は, チューター (Tutor) と指導教官 (Director of Studies) の制度であろう。学生にはチューターと指導教官が一人ずつつく。チューターが学生の生活指導の役割を担当するのに対して, 指導教官はスーパーヴィジョン (Supervision) と呼ばれる個人指導を担当する。スーパーヴィジョンとは主にカレッジのフェローが学生を 1 対 1, あるいは 2, 3 人の少人数で指導をすることで, きめられた科目毎に毎週 1 回学生が学習した内容を議論し指導をする。さらに学部での講義の補習もここで行われる。これがケンブリッジの伝統的で最も特徴的な教育制度である。ケンブリッジ大学全体の学生数は, 最近の統計によれば学部学生 (Undergraduate) が約 12000 人, 大学院学生 (Postgraduate) が約 7400 人である。従ってカレッジ 1 校あたり平均の学部学生数は約 390 人である。ケンブリッジ大学の修学期間は 3 年であるが, 最近理工系の一部の学部で 4 年コースが選択できるようになった。なお, 現在の授業料は大学が 9000 ポンド (約 160 万円), Trinity College は寄宿費込みで約 6600 ポンド (約 120 万円) であり, かなり高額である。

3. Trinity College と偉人たち

私は留学先としてケンブリッジ大学の地球物理学教室と Trinity College に所属することがきまっていたが, 不勉強でそれがどんなカレッジであるかほとんど知らずにケンブリッジに行ったことになる。Trinity College の門をくぐって初めてその偉大な歴史と伝統を知ることとなった。私は大学院学生であったため, 残念ながらカレッジの宿舎に住むことはできなかったが, 毎晩夕食のためカレッジを訪れ, 食後学生たちとしばし歓談するのが常であった。Trinity College はケンブリッジ最大のカレッジである。2015 年の学生数は学部学生 711 人, 大学院学生 366 人で, 学部学生数は私がいた当時より少し増えている。女子学生の割合は約 35% である。フェローの数は約 180 人で学生数に対する割合はきわめて高い。

Trinity College は 1546 年, 英国王ヘンリー八世によって創設された, 王家と縁が深いカレッジである。エリザベス女王の父ジョージ六世やチャールズ皇太子も Trinity College で学生生活を送った。歴代のマスターにはそうそうたる顔ぶれがそろっている。20 世紀以降では電子を発見してノーベル賞を受賞した J. J. Thompson, 歴史家の G. M. Trevelyan, ノーベル生理学医学賞を受賞した Lord Adrian, A. Hodgkin, A. Huxley, 外務大臣を勤めた Lord Butler, 数学のノーベル賞といわれるフィールズ賞を受賞した M. Atiyah, ノーベル経済学賞を受賞した Amartya Sen, 宇宙論で有名な M. Rees である。現在のマスターは Sir Gregory

Winter で、やはり著名な生化学者である。私が留学した当時のマスターは Lord Adrian であり、温厚なお年寄りという印象がある。

万有引力の法則を発見したニュートンは Trinity College の出身である。ニュートンは 1661 年に Trinity に入学し、1669 年に 27 歳の若さで教授になり、1696 年までここで生活をした。ニュートンが住んでいたのは「ニュートン階段」と名付けられた E 階段を上がった 2 階 E 4 という部屋で、「プリンキピア」の構想を練ったのもここである。ただし、幸運なフェローか学生が今でもこの部屋に住んでいるので公開はされていない。Trinity College 出身のノーベル賞受賞者は 32 人にのぼっていて、ケンブリッジ大学全体の受賞者の半数近くを占めている。ただし、最近の受賞者の中には学部を他の大学で終了し、大学院を Trinity College で終了した人たちがかなりいる。受賞者の顔ぶれを見ても、Trinity は理系に強いカレッジであることがわかる。この他にも有名人には事欠かない。バイロン、マコーレー、ドライデン、テニソン、バートランド・ラッセル等、世界的に有名な文人もこの出身者であり、インドのネール首相もそうである。1 学年がわずか 200 人ほどのカレッジからこれだけの偉人たちが生まれたということは、特徴ある教育制度に加えて、何か人を引きつける魅力が Trinity College にはあるに違いない。それは、一時期をここで学んだ学生たちによって築き上げられた伝統と、470 年という長い歴史がもたらした風格であろう。

4. 地質年代測定法

岩石や鉱物中にはカリウムやウランなどの放射性同位体が含まれている。放射性同位体を利用して岩石や鉱物ができてからの年数を求める方法を地質年代測定法といい、この方法で求められた年代を放射年代あるいは同位体年代と呼ぶ。放射性同位体は放射性壊変を起して別の同位体になるが、その壊変の特徴は、実験室で作りうるいかなる物理的・化学的条件下でも速さが一定であるということである、つまり放射性壊変はきわめて正確な時計の動きにたとえることができる。

放射性壊変は

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

という式で表わせる。ここで N_0 は最初にあった放射性同位体の数、 N は時間 t における数であり、 λ が壊変定数と呼ばれる定数で同位体ごとに異なった値をもつ。また最初にあった同位体の数が半分になるのに要する時間を半減期という。そこで同位体の数は半減期ごとに $1/2$, $1/4$, $1/8$ と減少してゆく。上の式を書き変えると

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D}{N} + 1 \right)$$

となる。ここで N は放射性同位体(親同位体)の現在の数、 D は壊変で生じた娘同位体の数である。岩石の年代を測定するということは、上の式の D と N を求め t を計算するということになる。何千万年とか何億年という長い地質時代の岩石の年代を測るためには、それにあっ

た時計, すなわち半減期の長い放射性同位体を選ぶ必要がある. 以下に天然に存在し, 年代測定に利用できる長半減期の放射性同位体と, それらの壊変形式, 半減期等を示した.

主な年代測定法				
方法	同位体	半減期(年)	試料	年代範囲
K-Ar法	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	1.25×10^9	雲母, 角閃石, 海緑石, 火山岩	$> 10^5$ 年
Rb-Sr法	$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	4.88×10^{10}	雲母, カリ長石, 深成岩, 変成岩	$> 10^7$ 年
U, Th-Pb法	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	4.47×10^9	ジルコン, モナズ石, チタン石,	$> 10^8$ 年
	$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	7.04×10^8	閃ウラン鉱	
	$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	1.40×10^{10}		
Sm-Nd法	$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$	1.06×10^{11}	変成岩, 火山岩, 深成岩	$> 10^9$ 年
フィッション・トラック法	^{238}U の自発核分裂	$\lambda = 7 \sim 8 \times 10^{-17}/\text{y}$	ジルコン, ガラス, リン灰石	$> 10^3$ 年
^{14}C 法	^{14}C	5730	木片, 泥炭, 貝殻, 骨	$< 4 \times 10^4$ 年

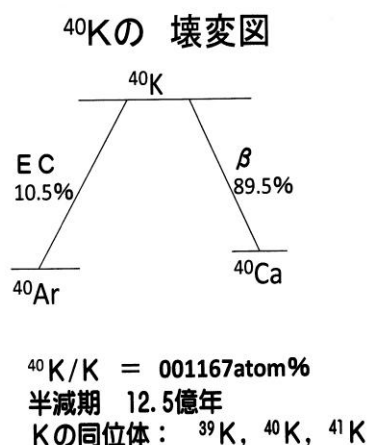
これらのうちウランについては放射能が発見されてまもなく, 1905年に Rutherford が U/He 比から, また 1907 年には Boltwood が U/Pb 比から年代が測定できることを示した. しかしその他の放射性同位体について年代測定が試みられたのはずっと後のことである. 例えば K-Ar 法, Rb-Sr 法は 1940 年代, 希土類元素を利用する測定法は 1970 年代になってからである. 年代測定の開発にあたっては質量分析計の開発が重要な役割を果たしてきた. コンピュータを使用する高性能の分析計が新しい測定法を生み出すなど, 年代測定の開発の歴史はまさに科学技術の発展の歴史と重なり合う. 巻末に柴田 (1988) による「年代測定法開発の歴史」を示した.

5. K-Ar 法

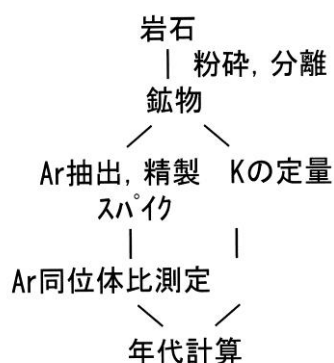
K-Ar 法は ^{40}K が電子捕獲 (EC, 極わずかに β^+ 崩壊) により ^{40}Ar に壊変することを利用する (次ページ図). カリウムは地殻の主要元素で多くの造岩鉱物に含まれる, ^{40}K の半減期が適当で殆どすべての年代に対応, Ar は不活性ガスで岩石や鉱物の通常成分ではないなどの特徴があり, 最も広く利用されている年代測定法である.

私は 1960 年 9 月から Miller 博士のもとで K-Ar 法による年代測定の初歩から実験を始めた. K-Ar 法の手順を次ページに示したが, 最初は岩石の粉碎で, このため多くの英国の花崗岩を手にとって眺めることができたのは幸いであった. それからカリウムの炎光分析, そして一番手間のかかるアルゴンの抽出・精製の実験を行った. 一通り実習が終わったところでいよいよ日本の岩石について年代測定を始めることができた. この研究室のアルゴン用の装置はほとんど自製で質量分析計も設計をここで行なって外注したものである. 加熱される部分と金属コックにとくに工夫がなされていてとても使いやすいものとなっていた. とくに私にとって参考となったのは装置全体が簡素にできていて製作が一部を除いてあまり面倒ではなさそうなことであった. 当時わが国で予算のとぼしい条件のもとで年代

測定の研究をするのにこのような装置はうってつけのものであると思った。



K-Ar法の実験操作



1960年11月には日本の岩石, すなわち山口県柳井市大畠の花崗岩で84Ma(Maは百万年)という最初の年代が出た。この時はさすがに興奮した。それから日本から送られてくる黒雲母などの試料について次々と年代測定をすることとなり, 忙しい日々が続いた。1年足らずのケンブリッジ大学滞在でK-Ar年代測定の基本的な技術をマスターし, 帰国後すぐ地質調査所で年代測定のための準備にかかった。アルゴン抽出装置については, 良質の金属ガasketや金属コックがないなどのため, ケンブリッジで使われていた主として金属からなる装置をつくることができず, パイレックスガラス製にした。加熱部分は石英管を使用しパイレックス管とは段継ぎをした。試料の取替えには毎回3cm以上あるガラス管の切り継ぎを行わなければならず苦勞した。質量分析計については既存の日立RMU-5RB型を使った。この装置は安定同位体組成の精密測定用のもので, Ar同位体比測定用に改良が加えられた。これが地質調査所における第1世代の装置である。測定方法の詳細は柴田(1964)に記載されているが, この方法で測定された年代の論文が公表されたのは1965年5月であり, 技術開発に2年の歳月がかかったことになる。新たな研究を始めるには常に困難が伴うということを, 今改めて実感したわけである。

微量アルゴンの同位体比測定を行なう質量分析計に必要なことは感度が高いこと, 精度がよいこと, バックグラウンドの少ないことなどである。カリフォルニア大学のReynoldsは1956年にきわめて感度の高いガラス製質量分析計を試作し希ガスの研究に利用した。この型の質量分析計は金属製のものに比べていくつかの利点を持つことが示された。たとえばもれがほとんどない, 装置全体を焼出して吸着ガスを十分追い出せる, バックグラウンドが低い, 製作が容易なことなどがあげられるが, さらに重要なことは製作費が安いことであろう。この装置は“レイノルズ型”質量分析計として当時広く使用されていた。わが国においてレイノルズ型質量分析計に本格的にとりくんだのは三菱電機中央研究所であった。1964年にMS-315G型質量分析計として1号機が東京大学地球物理学教室に納入された。

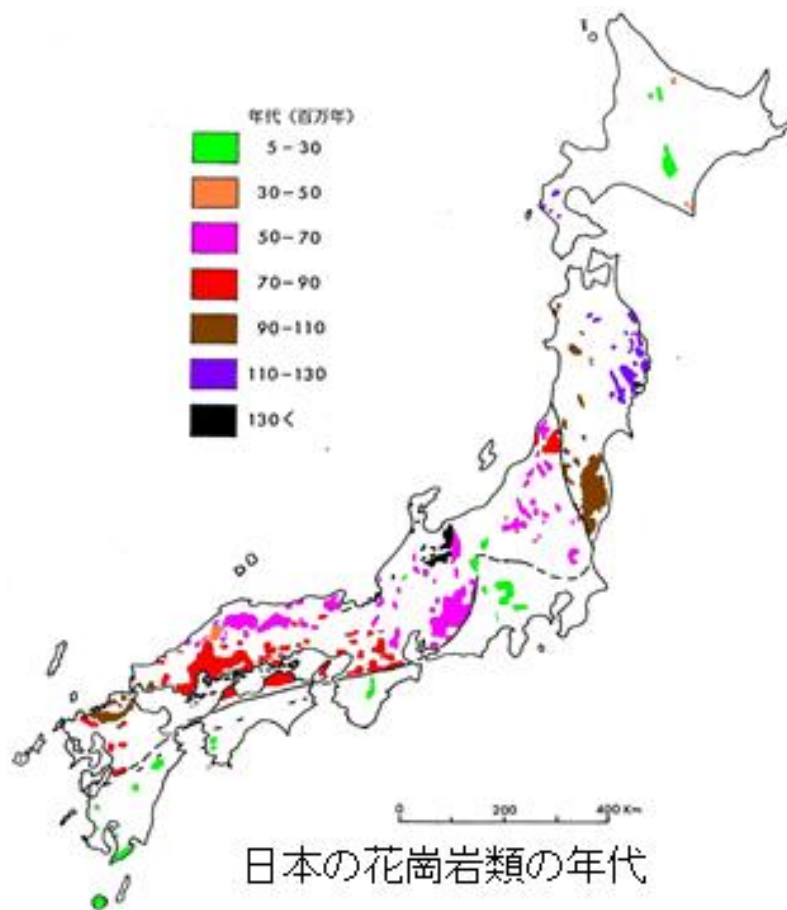
地質調査所においても MS-315G 型が 1965 年春に設置され、半年ほどの調整期間の後実用化された。抽出装置にも改良が加えられて、年代の量産が可能になった。これが第 2 世代の装置である。カリウムの分析も炎光光度法から原子吸光法に変わっている。1975 年に小型、全金属製の Micromass6 型質量分析計が導入されて微量のアルゴン同位体比測定、つまり若い年代の測定が可能となった。これが第 3 世代の装置である（下図）。



1987 年には第 4 世代の質量分析計として VG Isotopes 1200C が導入され、あわせて抽出装置も全金属製のものになった。 ^{38}Ar スパイクを用いない感度法という測定方式をとることで、10 万年より若い火山岩の年代測定が可能となった。この頃よりカリウムの分析は炎光光度法にもどった。

6. K-Ar 年代研究成果

地質調査所において K-Ar 年代測定の体制が整うにしたがって調査所の研究者のみならず、大学の研究者からも測定の依頼が殺到した。そのため鉱物分離などの試料調製に一人、カリウムの分析とアルゴンの測定のために一人の技術者をつけていただいた。K-Ar 年代については測定ごとに通し番号が付けられていて、1993 年に私が退職した時には 2100 を超えていた。同じ試料を複数回測定したり、測定値が不良だったりしてこの数がそのまま公表できた年代データ数ではないが、相当な数の年代データの蓄積となった。対象となった試料は花崗岩が最も多く、鉱物としては黒雲母が大半である。変成岩と火山岩が残りのほとんどを占めている。日本列島の花崗岩は分布面積が約 12% であり、石材として広く利用されている。これらの花崗岩の年代は日本の地質の基本情報として積極的に測定された。地質調査所とほぼ同じくして東北大学でも大々的に K-Ar 年代測定を実施していた。1970 年代には日本の主だった花崗岩の年代が明らかにされた。次ページに日本の花崗岩の年代分布図を示した（柴田，1985a）。花崗岩は西南日本で分布が広く、地域的に年代に違いがあることがわかる。西南日本外帯（紀伊半島，四国，九州の南部）には小規模ながら特徴ある花崗岩が分布している。図中の緑色の部分で、K-Ar 年代が $14 \pm 1\text{Ma}$ と限られた時期に出来たことを 1978 年に発表した。図では表現できないが 200Ma を超す古い年代も小規模であるが日本各地に存在することもわかってきた。



年代測定の研究で忘れられない共同研究者がある．地質調査所地質部の野沢 保博士である．野沢さんとは 1960 年代初めから K-Ar 年代の共同研究を始めた．一緒に野外調査を行い，飛騨変成帯，外帯花崗岩などについて 1966 年から 2 年間で 13 編の英文の論文を書いた．共同研究は 1980 年代半ばまで続きこの間の共著論文は 23 編になった．野沢さんは退官後，愛知県豊田市に社会福祉法人・無門福祉会「無門学園」を開設し，理事長として 24 年間にわたって地域の福祉事業推進に尽くされた．残念ながら 2015 年 3 月に亡くなられた．もう一人，K-Ar 測定の技術者として長い間私を支えてくれた内海 茂さんのことも忘れられない．ガラス加工の腕前は一流であった．内海さんも 2012 年に亡くなられた．心よりお二人のご冥福をお祈りする次第である．

7. Rb-Sr 法

Rb-Sr 法は ^{87}Rb が β 壊変して ^{87}Sr になることを利用して年代を測定する方法である．年代測定の計算式は

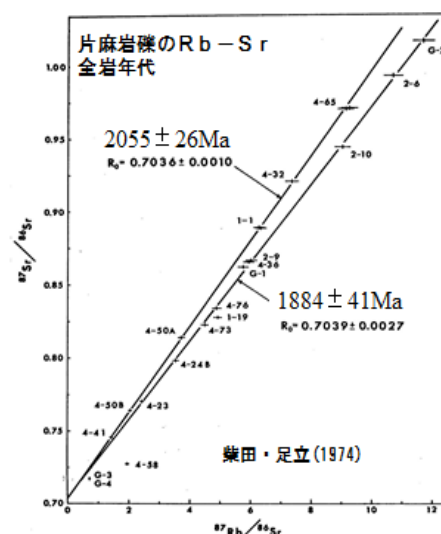
$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

である．式中の λ は ^{87}Rb の壊変定数， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ は岩石・鉱物について直接測

定される値である． $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値 (initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio) と呼ばれる値で，岩石・鉱物ができた時に存在していた Sr の同位体組成である．年代の計算においては Rb/Sr 比の異なる 2 個以上の試料を測定することにより年代と $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ を同時に求めることができる．この方法はアイソクロン法と呼ばれていて， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を縦軸， $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ を横軸として示すアイソクロン図（下図）として表現される．すなわち複数の岩石・鉱物の測点によって作られる直線の勾配から年代が，また縦軸との交点から $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ が求められる．全岩試料による $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ は岩石成因を議論する際のきわめて重要な値である．なお ^{87}Rb の壊変定数 λ は研究を始めた当時は $1.47 \times 10^{-11}/\text{y}$ が使われていたが，1977 年に $1.42 \times 10^{-11}/\text{y}$ （半減期 488 億年）に改訂された．そのため古い年代値を使用する場合は換算が必要となる． ^{40}K の壊変定数についても 1977 年に改訂された．

地質調査所における Rb-Sr 法の研究は 1969 年に日本電子の固体型質量分析計の導入とともに始められ，軌道に乗るのにそれほどの時間はかからなかった．私は 1967-69 年の 2 年間，カナダ NRC Post-doctorate 研究員としてカナダ地質調査所に出張した．ここでは主に飛騨変成帯の Rb-Sr 年代測定の研究を行ったので，帰国後カナダで習得した技術をただちに生かすことが出来たのは幸運であった．

この時期の重要な研究の一つとして，日本最古の岩石の発見がある．名古屋大学大学院の学生であった足立守氏（現名大特任教授）が岐阜県七宗町上麻生の川原で奇妙な礫岩を発見し，礫の年代測定を私に依頼したのが事の始まり，1970 年の秋のことであった．1971 年 3 月最初の測定結果が出て大騒ぎとなった．K-Ar 法で何と 13 億年である．これこそ日本最古の岩石ということで，NHK テレビ「スタジオ 102」にも出演することになった．その後 Rb-Sr 法による年代測定を行い，この岩石は 20 億年もの昔にさかのぼることが明かとなった．発見現場近くには 1996 年「日本最古の石博物館」が出来た．上麻生礫岩中の片麻岩礫は現在でも日本最古の岩石である．下は上麻生礫岩の産地とアイソクロン図である．



そのほかでは、北上山地の氷上花崗岩の年代測定、日本の花崗岩の Sr 同位体初生値の研究、堆積岩の年代測定、断層活動史の年代学的研究、古領家帯の復元など、重要な研究テーマであるがここでは取り上げない。1980 年には Micromass54E 型の固体型質量分析計が導入された。これは全自動、高性能の装置で、Sr 同位体比を 0.01% の精度で測定できる。日本電子の分析計より 1 桁以上精度がよい。しかし、最近氷上花崗岩の同一試料について、名古屋大学の高性能の同型質量分析計で Sr 同位体比の測定をして古いデータと比較したところ、誤差の範囲内で一致することが分かった。古い分析計による測定値の信頼性が証明されたことになる。

8. U-Pb 法

U-Pb 法は最も古い年代測定法である。1907 年に Boltwood は Pb/U 比から実際にウラン鉱物の年代を求めた。当時ウランの壊変定数は不確定であり、同位体も発見されていなかったのもので化学鉛年代とよばれた。ウランには 2 つの同位体、 ^{238}U と ^{235}U があり、複雑な壊変を経てそれぞれ ^{206}Pb と ^{207}Pb に変わる。一つの鉱物について独立に 2 つの年代が求められるという特徴がある。U-Pb 年代測定に用いられる鉱物はジルコンが圧倒的に多い。ジルコンは多くの種類の岩石に含まれていて、安定な鉱物であるためである。かつてはジルコンを多数集めて鉛を抽出して同位体比測定をしていたが、1970 年代にオーストラリア国立大学のグループが Pb 同位体比を精密に測定することが可能な高感度二次イオン質量分析計 (SHRIMP) を開発したことにより、個々のジルコン粒子の年代を求めることが出来るようになった。これにより U-Pb 年代測定の応用範囲が飛躍的に拡大した。世界最古の岩石はカナダのアキャスタ片麻岩で 40 億年であるが、この年代も 1989 年に SHRIMP で求められた。しかし SHRIMP は大型で高価なため世界的にも限られた機関しか導入されていない。

今世紀に入ってレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LA-ICP-MS) を用いるジルコンの U-Pb 年代測定法が開発された。装置が比較的安価なこと、大量の試料を短時間で測定できるなどの利点から、今や年代測定の主流になりつつある。火成岩のジルコンは勿論のこと、砕屑岩中のジルコン年代から後背地や堆積年代の推定にも利用されている。

私は在職中には U-Pb 年代測定に携わることはできなかったが、私どもが発表した K-Ar 年代や Rb-Sr 年代について、最近 LA-ICP-MS による検証がなされていて目が離せない。例えば氷上花崗岩について、Rb-Sr 年代が 350Ma であるのにジルコンの U-Pb 年代は 450Ma と違いが認められる。一方西南日本外帯の花崗岩の年代は K-Ar 法で $14 \pm 1\text{Ma}$ だが、最近の U-Pb 年代によってそれが証明された。このように K-Ar 法や Rb-Sr 法は以前ほど利用されなくなり、測定ができる機関も少なくなった。しかし K-Ar 法では同一岩石中の複数鉱物の年代の違いから冷却速度の推定、Rb-Sr 法では Sr 同位体初生値から岩石の生成過程の違いがわかる、など U-Pb 法にはない利点もあり、技術的な継承は続けていってほしい。

9. おわりに

ケンブリッジ大学留学は短い期間ではあったが、私にとってその後の研究活動を方向付ける転機となった。大学や Trinity College から送られてくる年数回の広報誌、ほぼ 10 年ごとに招待される College の同窓会など、いまだに深いつながりがあり、ケンブリッジはある意味私の人生の一部をなしている。しかし私が学んだ地球物理学教室については、その後何度か訪れているが私がいた当時の輝きはない。優れた指導者がいて、世界中から優秀な学生が集まってトップレベルの研究を行うことの重要性和それを維持することの難しさを感じている。これは大学に限らずどこの世界にも起こりうることで、指導者は常に留意しなければならない問題である。

年代測定に必須の装置である質量分析計は、地質調査所で年代測定研究を始めた 1960 年代から飛躍的に開発が進んだ。あわせてエレクトロニクスや超高真空技術の開発も急速に進み、精度の良い年代値が迅速、大量に得られるようになり、また新しい年代測定法も開発された。Ar 用質量分析計についてみても、30 年間に 4 種の装置を使うこととなり、更新のたびに技術開発が進み、数万年という若い年代の測定もできるようになった。測定技術についてはほぼ完成の域にあると言ってよい。そして地質年代学が日本の地質学発展に果たした役割はきわめて大きい。日本列島の地史が 20 億年もの昔にさかのぼり、列島発達史が時間的スケールを伴って構成され、議論できるようになった。地質調査所における年代測定研究もこの分野の発展にかなりの貢献をしたといえる。

地質調査所での年代測定研究を振り返ってみるに、共同執筆、試料提供、技術援助など、数多くの方々の協力をいただいた。200 編以上になる論文リストを眺める度にそれらの方々の顔がなつかしく思い出される。あらためて感謝の意を表して本稿を終えたい。

謝辞 AIST 秘話に寄稿をお勧めいただき種々のご助言を賜った産工会副会長小玉喜三郎博士、原稿を読んでいただき貴重なご教示を賜った名古屋大学鈴木和博名誉教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 柴田 賢(1962)：ケンブリッジ大学での研究生活。地質ニュース，No. 90，22-25.
- 柴田 賢(1964)：カリウム-アルゴン法による地質年代決定。地質ニュース，No. 123，10-16.
- 柴田 賢(1967)：K-Ar年代測定用質量分析計。地質ニュース，No. 155，6-12.
- Shibata, K. and Adachi, M. (1974)：Rb-Sr whole-rock ages of Precambrian metamorphic rocks in the Kamiaso conglomerate from central Japan. Earth Planet. Sci. Letters, **21**, 277-287.
- 柴田 賢(1978)：西南日本外帯における第三紀花崗岩貫入の同時性。地調月報，**29**，551-554.
- 柴田 賢(1985a)：地質年代学に関する技術的進歩と日本における年代学的研究。

地質学論集, No25, 391-405.

柴田 賢(1985b): Rb-Sr法. 地学雑誌, 94, 682-686.

柴田 賢(1988): 地質年代測定法. ぶんせき, No. 8, 557-564.

柴田 賢(1990): 最古の岩石, その後—アミツォク片麻岩からアキャスト片麻岩へ—. 地質ニュース, No. 429, 6-12.

柴田 賢(2001): ケンブリッジ大学のカレッジ制度—トリニティー・カレッジの栄光—. 名古屋文理大学紀要, No. 1, 167-173.

Williams, C, A. (2009): Madingley Rise and Early Geophysics at Cambridge. Third Millennium Publishing, 208 p.

表1 年代測定法開発の歴史

	科学技術 (関連分野)	年代測定法	地球の年齢 最古の岩石
1800		堆積速度 地球の冷却史 海水の塩分	～6 億年 2000～4000 万年 9000 万年
1900	放射能の発見 (1896) 放射性同位体の発見 (1906)	最初の放射年代測定 (U-He 法, 1906 ; U-Pb 法, 1907)	3～22 億年 (岩石の年代)
1910	安定同位体の発見 (1912) 質量分析器 (1918)		最初の地質年代尺度 (1913)
1920		日本における最初の年代測定 (U-He 法, 1926)	
	β 線計数管 (1928)		
1930	サイクロトロン (1930) ウランの核分裂の発見 (1938) 質量分析法による同位体希釈分析 (1939)		
1940	質量分析計 (Nier 型, 1940) 天然放射性炭素(^{14}C) の発見 (1947)	Rb-Sr 法 (1943) K-Ar 法 (1948) ^{14}C 法 (1949)	39 億年 (Pb 同位体, 1942)
1950	原子炉による放射化分析 (1951) 超高真空技術 (イオンポンプ, BA ゲージ, 1953)		45.5 億年 (隕石の Pb 同位体, 1956)
1960	二次イオン質量分析計 (1963) アポロ11号月着陸 (1969) 高性能固体用質量分析計 (1969)	日本における K-Ar 年代測定 (1961) フィッシュン・トラック法 (1962) ^{40}Ar - ^{39}Ar 法 (1965)	顕生時代の年代尺度 (ホームズ・ シンボジウム, 1964)
1970	(コンピューター, オンライン)	Sm-Nd 法 (1973) 加速器による ^{14}C 法 (1976)	月の岩石の年代測定 (1970) 世界最古の岩石 (アミツォク片麻岩, 38 億年, 1971) 日本最古の岩石 (上麻生礫岩礫, 20 億年, 1971)
1980		Lu-Hf 法 (1980) La-Ce 法 (1982)	
1990			最古の鉱物 (43 億年, 1986)

柴田 (1988)

【著者略歴】

1932 年(昭和 7 年) 8 月 27 日 愛知県瀬戸市生

1955 年(昭和 30 年) 名古屋大学理学部地球科学科卒業

1955 年(昭和 30 年) 名古屋大学大学院理学研究科地球科学専攻課程入学

1956 年(昭和 31 年) 通商産業省工業技術院地質調査所燃料部石油課

1959 年(昭和 34 年) 地質調査所技術部地球化学課

1960-61 年(昭和 35-36 年) British Council 奨学生として英国ケンブリッジ大学留学

1967 年(昭和 42 年) 理学博士(名古屋大学)

1967-69 年(昭和 42-44 年) カナダ NRC Post-doctorate 研究員としてカナダ地質調査所出張

1978 年(昭和 53 年) 地質調査所技術部地球化学課長

1983 年(昭和 58 年) 日本地質学会賞受賞, 放射年代の測定

1988 年(昭和 63 年) 地質調査所首席研究官

1988 年(昭和 63 年) 工業技術院長表彰, 日本列島構造発達史に関する放射年代学的研究

1989 年(平成元年) 地質調査所地殻化学部長

1993 年(平成 5 年) 名古屋大学理学部教授

1993 年(平成 5 年) 日本地質学会小藤賞(共同)受賞, 論文: 地質学雑誌, 98 巻, 547-550 頁, 1992

1994 年(平成 6 年) 名古屋大学年代測定資料研究センター長兼任

1996 年(平成 8 年) 名古屋大学停年退官

1996 年(平成 8 年) 名古屋文理短期大学教授, 情報処理学科長

1999 年(平成 11 年) 名古屋文理大学情報文化学部教授

2002 年(平成 14 年) 叙勲, 勲三等瑞宝章

2003 年(平成 15 年) 名古屋文理大学定年退職

2007 年(平成 19 年) 日本岩石鉱物鉱床学会渡邊萬次郎賞受賞, 同位体年代学の発展

受理日: 2016 年 3 月 1 日