

環境中のベリリウムとその地球化学

金井 豊¹⁾

1. はじめに

ベリリウム (Be) という元素は、一般には馴染みが少ないかもしれない。しかし、宝石のエメラルドの構成元素と言えば比較的よく知られているかもしれない (エメラルドなどについては、奥山 (2013a, 2013b) を参照)。エメラルドは、ベリリウムを含む緑柱石 ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) にクロムを不純物として含み、濃い緑色をしたものである。同じ緑柱石で2価の鉄を含み水色に見えるアクアマリン、3価の鉄を含み黄金色に見えるヘリオドール、マンガンを含んで赤みのあるモルガナイトなどの緑柱石も宝石として知られている (Bonewitz, 2007)。同じベリリウム鉱物である金緑石 (クリソベリル) では、表面に猫の目のような光の筋模様が見える猫目石 (キャッツアイ)、光の当て方によって様々な色調に変化するアレキサンドライトなどの宝石もある。宝石以外のベリリウムの用途では、剛性・弾性が高く耐高温性を有するので、軍事・宇宙産業における航空機やミサイル、衛星の構造部材など、工業的にも広く利用されている。また、X線 (放射線) に対する透過性が非常に高いので、X線検出器の透過窓にも使われている。このように、ベリリウムは日常の私達の目に入らない隠れた分野でも大いに活躍している。

ベリリウムの利用は、宝石や産業においてばかりではない。著者らが関わっている地球科学の分野でも、過去に地球に起こったことや現在も起こっている様々な現象の把握や解明に大いに有用である。特に同位体を用いる研究は、半減期という時計が利用できるため、時間の軸を入れた研究が可能で重要である。本論では、このようなベリリウムの同位体について幾つかその特徴を紹介しながら、地球化学 (地球科学) 的な研究に関する話題を提供したいと考えている。その中で、著者らがやっているデルタ域の堆積物への応用研究も紹介したい。また、話題提供のうち、堆積学への応用研究全般についての詳細な研究例は、総説として金井 (2014a) で紹介しているので、そちらを参照されたい。

2. ベリリウムの同位体と化学特性・存在度など

ベリリウムという元素名は、緑柱石 (ベリル; beryl, ギリシア語で beryllos) に由来しており、1828年にドイツの化学者マルティン・ハインリヒ・クラプロートによってベリリウムと命名された。緑柱石を化学処理して元素発見につながった酸化物を得ていたわけであるから、その名称は当然のことであろう。元素としては、1798年にヴォークランが酸化物を確認しており、1828年ヴェーラーとビュシがそれぞれ独立に金属を単離した (Weeks and Leicester, 1968; Ihde, 1972)。

Be は、原子番号が4であるから単純な元素のように見えるが、その安定同位体は陽子4個と中性子5個の質量数が9の核種 ${}^9\text{Be}$ 、ただ1種のみという特徴がある。このように安定核種が一つしかない元素を「モノアイソトピック元素」(mono-isotopic element) と呼んでいる。ちなみに自然界で安定な元素の数は80で、そのうちモノアイソトピック元素は27種ある (海老原, 2005)。これらの内訳は、原子番号が奇数の元素が26、偶数の元素が1と、圧倒的に奇数の元素が多いが、その唯一の原子番号偶数の元素がBeなのである。

安定同位体は1種のみであるが、ほかの同位体はどうであろうか。実は、このほかに質量数が5から16までの11種の放射性同位体が確認されている (NNDC, 2014)。しかし、そのほとんどが不安定な短寿命核種であり、自然界で重要な核種は質量数が7と10の放射性核種、 ${}^7\text{Be}$ および ${}^{10}\text{Be}$ である。これらは地球の大気上空に存在する酸素 (O) および窒素 (N) から宇宙線による核破砕反応によって三重水素 (${}^3\text{H}$; トリチウム) や炭素-14 (${}^{14}\text{C}$) とともに生成しており、その生成速度に太陽活動が関係している。放射性核種の半減期は、一方は53.24日であり、もう一方は151万年 (139万年?) というように大きく異なり、また放射壊変形式も電子捕獲壊変 (EC) と β 壊変という違いがある。これらの核種については次章から詳細に述べていきたい。ちなみに、放射性核種の壊変定数・半減期は核種固有の定数であり、温度・圧力など環境によ

1) 産総研 地質情報研究部門

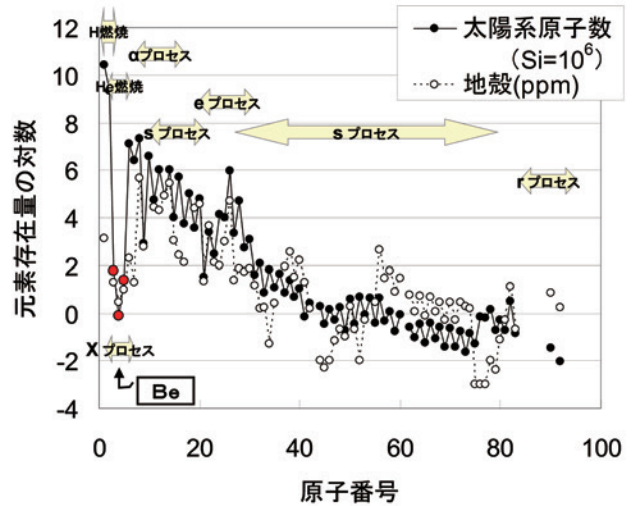
キーワード: 環境, ベリリウム, 地質学, 地球化学, デルタ堆積物, ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$

て変化はしないというのがこれまでの定説であったが、電子捕獲壊変ではその原子核の周りの電子密度によって半減期が変動する。その一番のよい例が⁷Beであり、化合物では約0.1%の変動が検出できたという (Draganic *et al.*, 1996)。

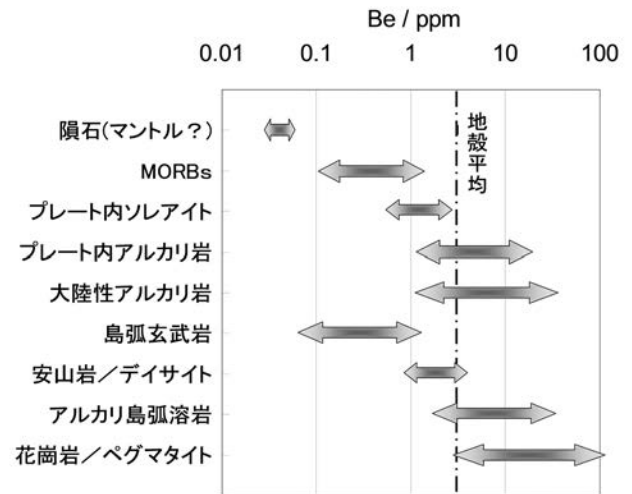
Beの化学的な性質としては、周期表でBeはマグネシウム (Mg) やカルシウム (Ca) と同じアルカリ土類金属元素であるが、亜鉛 (Zn) やアルミニウム (Al) と類似する両性金属の性質 (酸にもアルカリにも可溶) も有するという特徴がある。すなわち、アルカリによる水酸化物は白色の沈殿となるが、過剰のアルカリの存在で溶解するし、炭酸塩も白色の沈殿を作るが過剰の炭酸が存在すると同時に溶解する。このような特徴は、環境中におけるBeの地球科学的挙動にも影響を与えていることであろう。

さて、宇宙に存在する元素は、宇宙誕生のビッグバンが起こった時に水素 (H) やヘリウム (He) 等の原子番号の小さな軽元素がはじめに作られ、その後星の中でs-プロセス (赤色巨星), r-プロセス (超新星爆発) など様々な核反応を経て原子番号の大きな元素が核合成されていく (海老原, 2005)。このため、太陽系での存在比も第1図に示したように軽元素から重元素に向かって多少の変動を持ちながら減少していくという特徴がある。しかし、その特徴からするとBeおよびその前後のリチウム (Li), ホウ素 (B) の存在比は周辺元素の存在比から予想されるよりも少ない。これは、Li, Be, Bの3核種はこのような恒星の元素合成においては生成されず、宇宙線による核破碎によって炭素 (C) や窒素 (N) などのBeより重い元素から生成されるからである。このような核生成過程はx-プロセスと呼ばれている。このため、太陽系におけるBeの存在度は、原子番号が4番であるにもかかわらず、53番目の存在度となっている。

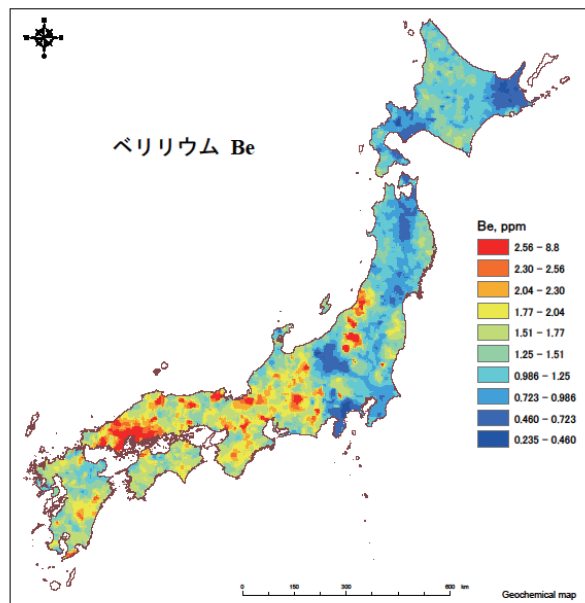
自然界における存在量は、上部大陸地殻で平均約3.1 ppm程度とされている (Wedepohl, 1995)。様々な火成岩におけるBeの濃度範囲 (Ryan, 2002) を第2図に示したが、玄武岩よりも花崗岩に多く含まれている。Beは親石元素で、メルトや結晶化では結晶に入りにくいインコンパチブルな微量元素である。堆積物では粘土鉱物の量に依存しているが、おおむね1~2 ppm程度の場合が多い。特に、アルミニウムと類似した性質を持つことからボーキサイト・ラテライトなどで高く、またマンガンノジュールなどでも高く、それぞれ7 ppmや15 ppmにもなる (Ryan, 2002)。河川堆積物では、日本での平均濃度は1.4 ppmとされ (今井ほか, 2004)、第3図に示したBeの地



第1図 太陽系における元素存在量と主な元素生成プロセスの一例。



第2図 火成岩におけるベリリウムの濃度範囲。

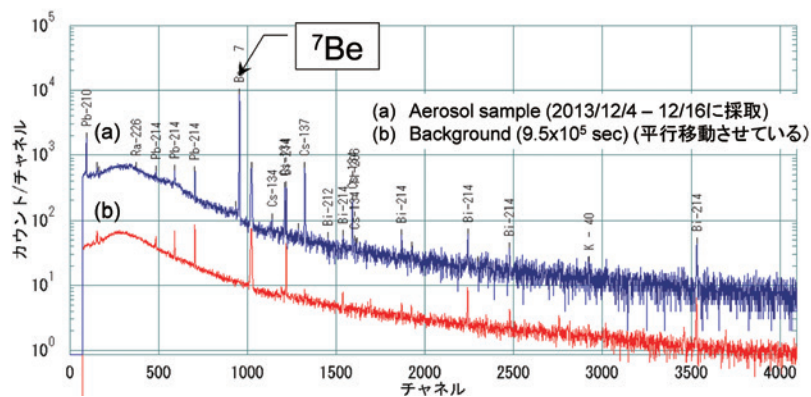


第3図 日本におけるベリリウムの地球化学図 (GSJ, 2014)。

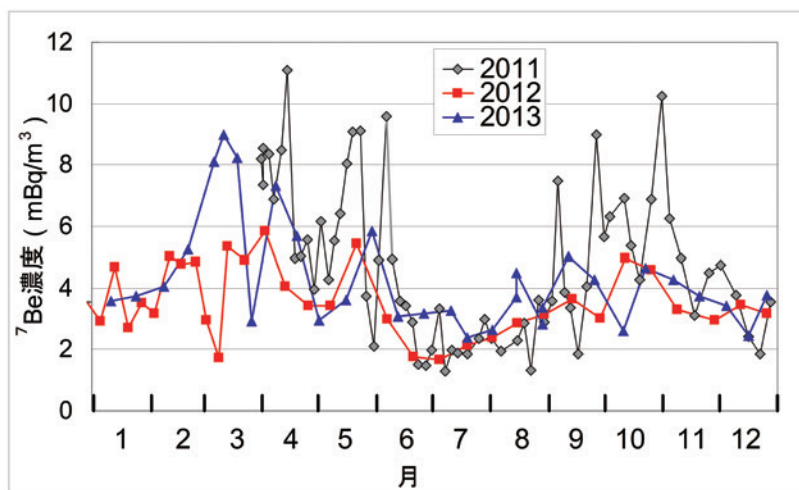
球化学図 (GSJ, 2014) では、花崗岩類の岩石が広く分布しているためか、東日本よりも西日本で高濃度となる傾向が認められる。鉱石で含有量の高い物は、そもそも元素の由来となっている緑柱石(ベリル)がよく知られており、文字通り緑色のきれいなものは宝石のエメラルドとして重宝がられていることはすでに述べたとおりである。

一方、微量分析法の発展とともに Be の実態が次第に明らかにされるようになると、大気中にも、石炭燃焼、ダスト、宇宙・軍事産業の冶金工業などを起源とする Be が浮遊していることがわかってきた。大気中の平均滞留時間は、安定同位体の ^9Be はかなり短く、地表面起源であることから推定して 9 日程度と見積もられているのに対し、放射性同位体では、成層圏中の ^{10}Be が 14 ヶ月、対流圏下層での ^7Be が 10 ~ 48 日というように、安定同位体の ^9Be よりも長い (Vesely *et al.*, 2002)。Be が有機物に濃集しやすい (Lundberg *et al.*, 1983) ことから石炭などでは高濃度となっており、空气中濃度は石炭灰の放出量にも依存している。国内のある鋳物作業場では、 $0.17 \sim 1.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の空气中濃度が報告されており、換気が減少する冬季に高くなる傾向があるという (中村ほか, 1979)。

多量の Be は動植物に有害であることから、その取り扱い方法や汚染問題に関心を高め、注意を払わなければならない。Be およびその化合物は人体には非常に有毒で、特定化学物質の第 1 類物質に指定され、特定管理物質としてその取り扱いに関しては厳しく規定されている。化合物が皮膚に付着すると皮膚炎を起し、傷口から入ると慢性の潰瘍となる。粉塵・ヒュームを吸入すると、呼吸困難・急性肺炎・気管支炎・ベリリウム肺となる危険性がある (厚生労働省, 2004) ので、その取り扱いには十分な注意が必要である。このため、作業場における局所排気装置のフード外側においては、 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えないこととしている (厚生労働省, 2004)。ちなみに、対流圏下層での ^7Be は、後述する大気中エアロゾル濃度を重量で示すと $10^{-19}\text{g}/\text{m}^3$ ($10^{-13} \mu\text{g}/\text{m}^3$) のレベルであり、有害性を気にかける必要は全くない。



第 4 図 Ge 半導体検出器を用いたガンマ線による ^7Be の検出。

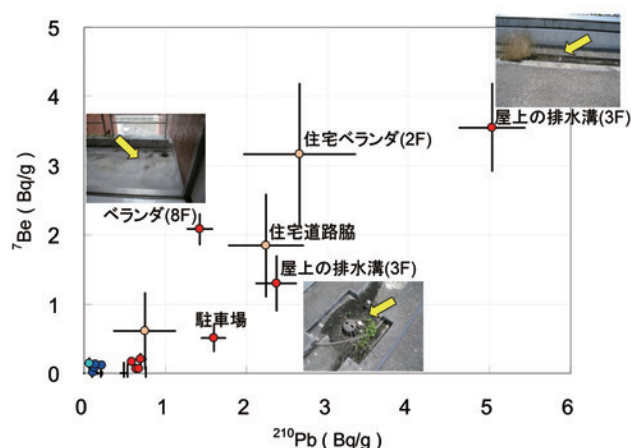


第 5 図 つくばで観測された大気中エアロゾルの ^7Be 濃度変化 (金井, 2014b)。

3. ベリリウム-7 同位体とその地球科学

大気上層の酸素および窒素が宇宙線による核破砕を受けて生成した ^7Be は、 BeO もしくは $\text{Be}(\text{OH})_2$ としてダスト粒子に付着し、そのダスト粒子は雲を作り降雨となって地表にもたらされる。このように考えた Arnord and Al-Salih (1955) は、シカゴにおいて 19 ~ 190 リットルの雨水を集め、そこから初めて ^7Be を検出した。後述する同位体 ^{10}Be よりも 1 年早い発見報告である。Goel *et al.* (1956) は 1 年遅れとなってしまったが、彼もボンベイにおいて雨水から検出している。

^7Be は半減期が 53.24 日と比較的短いので、数日~数ヶ月のタイムスケールの気象や地質現象の解明・トレーサーとしての利用が多い。大気上層から降下してくるので大気の動態を探る良いトレーサーとなっており、大気中の粒径分布や季節変動、フラックスやイベントリー (これまでの蓄積により現在存在している総量) 等が詳しく研究されている (Caillet *et al.*, 2001; Bourcier *et al.*, 2011; Renfro *et al.*, 2013)。

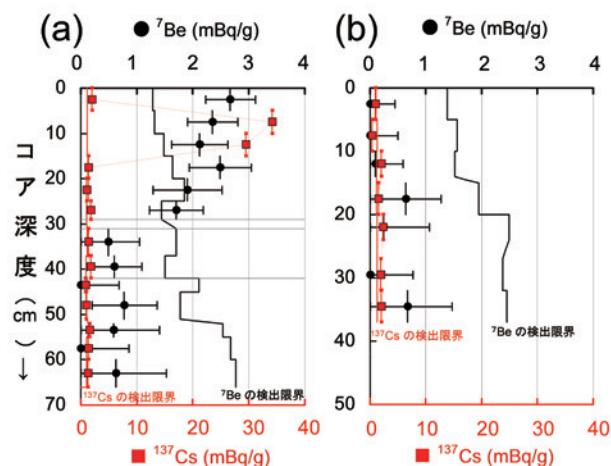


第6図 GSJおよび周辺地域で検出された堆積物中の高濃度⁷Beと²¹⁰Pbの一例。

⁷Beの定量には、半減期が短いので放射線測定が有効である。電子捕獲壊変(EC)して⁷Liになる時に10%の割合でガンマ線(478 keV)を放出するので、そのガンマ線を計測することで定量できる。第4図は、井戸型Ge半導体検出器を用いて、エアロゾル試料を測定したガンマ線スペクトルの一例である。際だって大きな⁷Beのピークが観察されているのがわかる。

第5図には、2011年から2013年にかけてつくばで採取したエアロゾル中の⁷Beの濃度変化を示した(金井, 2012; 金井ほか, 2013a; 金井, 2014b)。おおむね数mBq/m³の濃度レベルであり、これは同時に観測される鉛-210(²¹⁰Pb)濃度の約6倍の濃度となっている。大気中⁷Be濃度は、生成速度に関係する太陽活動、成層圏-対流圏の境界にある圏界面の破れや移動性高気圧による下降気流などの気象状況等にもよるが、つくばでは春季と秋季に高くなる季節変動(土井ほか, 1993; 土井・佐藤, 2004; 金井, 2012; 金井ほか, 2013a)があり、それは第5図でも確認できる。

大気中の⁷Beは地上に降下して土壌などの堆積物中に入るが、建造物の屋上や屋外階段、ベランダの吹きだまりのような箇所では、ダスト粒子がそのまま沈積することがある。屋上の排水溝やベランダの隅にたまった埃では、第6図に一例を示したように2~3.6 Bq/gの高濃度が検出されており、同時に測定された²¹⁰Pbも1.4~5 Bq/gと高濃度であった(Kanai, 2013)。⁷Beは半減期が短いので、私達の周りにある古い堆積物ではほとんど検出困難であるという意外性が興味深い。通常の堆積物であれば⁷Beはほとんど検出されず、また²¹⁰Pbも東アジア地域の湖底など



第7図 ベトナムのメコンデルタで採取されたコアにおける⁷Beと¹³⁷Cs濃度分布。(a)雨季(2011年10月)に採取 (b)乾季(2012年2月)に採取。

の表層堆積物では、湖の平均で0.1~0.6 Bq/gの範囲(測定点では0.05~0.80 Bq/g)と0.1 Bq/gのオーダーであった(Kanai, 2009)。一時、福島原発事故後に環境放射能に興味を持たれ、ビルの屋上で高濃度セシウム-137(¹³⁷Cs)とともに²¹⁰Pbも高濃度で一層の不安をかき立てられたことがあったが(Mochizuki, 2012)、これも意外性のニュースであろう。結局は、高濃度²¹⁰Pbは原発事故とは関係のない現象である。⁷Beと²¹⁰Pbの定常的な沈積を仮定すれば、半減期の異なる2核種によって沈積後の経過時間や古い土壌との混合割合などを推定できることも判明した(Kanai, 2013)。

降下物として地表に落ちると土壌粒子に強く結合するので、そのトレーサーとして動態の解明に利用できる。例えば、地表面の土壌等は風雨に晒されて河川に流されて沿岸域に堆積する。従って堆積場の表層にある新しい堆積物には⁷Beが存在しているが、4半減期に相当する約200日経過すると1/16に減衰し検出困難となってしまいます。すなわち、堆積物中に半減期の短い⁷Beが検出されるということは、200日以内の堆積物であることを示唆している。その一例を我々の例で示そう。

斎藤ほか(2013)は、アジア沿岸域に多数分布しているメガデルタ(巨大三角州)の沿岸環境保全のための観測、診断・評価技術の確立のために、ベトナム南部のメコンデルタを対象とし、沿岸侵食に焦点をあてて研究を行った。衛星データや数値シミュレーションによる解析と併せて、地形と堆積物の調査が行われ、ベトナムのメコンデルタの堆積物を採取してその中の⁷Beを調べた(金井ほか, 2013b)。

試料は、2011年10月の雨季と翌2012年2月の乾

季に採取されたコアである。第7図に示されるように、2011年の雨季に採取されたコア堆積物(a)の表層(深度約30 cmまで)で ^7Be が検出されたが、翌年の乾季に採取した試料(b)では最表層部でも検出限界以下であった。表層で観察された ^7Be は、調査間隔の3~4ヶ月後にはその28%に減衰して検出限界レベルを下回るため検出不可能となることから、2012年2月時点では ^7Be を含む新たな堆積物の付加がなかったか、もしくは浸食されて無くなっていたことを示唆している。偶然にも雨季に採取したコアの深度5~15 cmにおいては、セシウム-134(^{134}Cs)と ^{137}Cs も同時に検出されており(第7図では ^{137}Cs のみを表示)、乾季の試料ではほとんど検出されなかった。放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}Cs)は2011年3月に起こった巨大地震と津波によって起こった福島第一原子力発電所事故で放出された半減期の長い核種(^{134}Cs は2年、 ^{137}Cs は30年)で、3~4ヶ月で減衰消滅しないことから、この事実も雨季の堆積物が次の乾季には除去されたことを示している。このように堆積物中の ^7Be を調べることで、その堆積物の新旧を解明することができた(金井ほか, 2013b)。

^7Be は存在量が微量で、かつ半減期が短く減衰の速い核種であるため、このような沿岸堆積物コア中における ^7Be 濃度変化を定量的に明らかにした研究例は、これまで国内においてはほとんど報告されていなかった。本研究の場合、試料採取から日本に持ち帰って前処理等を行い、最初の試料測定開始までに約2週間を要し、1試料の測定時間を3~4日間としても最初のコアの数点を測定し終える時には ^7Be の半減期を超える約2ヶ月が経過していた。試料採取から測定時までにはかなり時間経過があり(2ヶ月以上)、それによる減衰と検出限界の上昇とにより、複数のコアのすべての分割試料で有意の値を確認することは困難であることが、これまで研究例が少ない理由であろう。我々は困難ながらも実際に堆積物に適用し、 ^7Be の他に ^{210}Pb や放射性セシウム同位体等がデルタ堆積物を研究する優れた道具となることを示すことができた。今後は、更なる手順の迅速化、測定のマルチ化などを検討する必要があると考えている。

ところで、土壌粒子の良いトレーサーとなる ^7Be は、環境保全や農業施策と密接に絡んで重要な課題の一つである地形浸食や農地の土壌流出などの分野でも、広く利用されている。土壌の再移動・再分配の研究には、様々な仮定(Parsons and Foster, 2011, 2013; Mabit *et al.*, 2013)の下で半減期の長い ^{137}Cs を用いる確立された解析手法があ

り、そのインベントリーの大きさ、変動、分布などが議論されている(例えば、IAEA, 1998)。これは、浸食も蓄積も起こっていない対照地と調査地のインベントリーを比較して、土壌損失および蓄積のエリアを識別するものであるが、 ^7Be や ^{210}Pb , ^{137}Cs , ウラン系列核種などを含めた環境中の放射性核種を様々に組み合わせた研究例も多い。

例えば、 ^7Be および ^{137}Cs の半減期の違いから、数日から数十年間という種々のタイムスケールで起きた耕作農地土壌の再分配を明らかにした研究例(Walling *et al.*, 1999)や、土壌において示す ^7Be 、過剰 ^{210}Pb および ^{137}Cs の異なる深度分布パターンを利用して懸濁堆積物が土壌のどの部位に由来したのか、どのようなタイプの浸食が行われたか(例えば、シートフローか、細溝(リル)浸食か、ガリー侵食か)、などを推測した研究例(Wallbrink and Murray, 1993)などがある。

また、陸ではなく海洋に降下した ^7Be は表層海水のトレーサーとなる。Inoue *et al.* (2013)は、ラジウム同位体比($^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$)と ^7Be を利用して、日本海の対馬海流における移流パターンを解析した。 ^7Be は50m以深で急激に濃度が低下していたことから下方への移動は少ないとし、50m以浅での平均滞留時間を40~70日と見積もった。河川などの水中でも、川底から再懸濁される「古い」堆積物と、雪解け水の「新しい」堆積物を区別する指標や、水中の再浮遊物質の量の定量などにも ^7Be が利用されている。

4. ベリリウム-10同位体とその地球科学

地球の大気上空の窒素が宇宙線による核破砕で ^3H (T)や ^{14}C が生成していることをLibby(1946)が初めて報告したが、その後Peters(1955)が ^{10}Be も同様に宇宙線による核破砕で生成することを予言し、程なくArnord and Al-Salih(1955)やArnord(1956)によって ^{10}Be および ^7Be の生成していることが報告された。 ^{10}Be の存在を初めて確認したのは、Arnord(1956)が海底堆積物に見いだしたのが最初であろう。彼は赤粘土中の濃度を約0.1 mBq/cm³であるとし、大気上空での窒素・酸素などの陽子による核破砕反応による生成量を 4×10^{-2} atom/cm²・sと算出した。Muller(1977)は、これを 1.5×10^{-2} atom/cm²・sとしているが、20年以上も前に近似した見積もりをしていたことは驚きだ。Draganicほか(1996)は、全地球的インベントリーを430 tとしている。

^{10}Be は151万年(139万年?)という比較的長い半減期を有するので、その時計を利用して数100万年という

タイムスケールの年代測定や ^7Be とは比較にならないほど長期にわたる地質事象のトレーサーとして利用できる。例えば、 ^{10}Be の二次的移動がなく堆積速度が一定という仮定をおけば海洋底の堆積年代を算出できるし、マンガンノジュールのゆっくりとした成長速度も、ウランやトリウムと同位体比を利用した $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 法や $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 法のように算出できる。

また、海洋に降下した ^{10}Be に対して大地の風化によって供給される安定同位体 ^9Be を組み合わせた $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比は、大陸の浸食速度の指標となる。即ち、地中海のように陸からの寄与の大きな海水ではこの比は小さく、太平洋のように陸からの寄与が小さく降下 ^{10}Be 量が多い海水では大きい。このため、過去から現在までの海洋への陸源物質のフラックスの指標としてこの比を利用した研究例がある(von Blanckenburg and Bouchez, 2014)。

陸上では、土壌の年代測定・生成速度や地形面の形成・発達過程の研究に応用される(例えば、横山ほか, 2005; 松四ほか, 2007)。 ^{10}Be の適用法には2種類あり、一つには「Meteoric ^{10}Be 法」といわれる高層大気中から地表面に降下して蓄積したインベントリーの時間変化を利用して解析する手法であり、もう一つは「in situ ^{10}Be 法」と呼ばれる地表の岩石表面の石英鉱物などの酸素から宇宙線で生成した ^{10}Be を定量する手法である。研究例としては、前者による土壌の年齢測定(前島・永塚, 2011)や後者による氷成堆積物形成年代測定(青木, 2000)などがある。

^{10}Be は放射性ではあるが、低濃度で半減期が非常に長い核種であるために放射線測定は不可能に近い。このため、測定には壊変数ではなく核種数を直接計測する加速器質量分析法(AMS法)が利用される。AMS法は1977年に初めて報告されたが(Muller, 1977)、その後1980年代に普及し始め、さらに1990年代には高感度化も加わって、 ^{10}Be の生成速度変動に関連する過去の太陽活動や地球磁場の変動などの氷河期事象や沖積扇状地の表層、河岸段丘・海岸段丘、黄砂や風成塵の履歴、火山噴火、地滑りなどの年代測定など、多方面に適用されている(Bierman *et al.*, 2002; 横山ほか, 2005; 松四ほか, 2007; Belmarker *et al.*, 2008)。ちなみに、我が国では約9台のAMS装置が稼働中であるが、その多くが ^{14}C 専用機とされ(若狭ほか, 2004)、 ^{10}Be の測定に利用されているものは少ない。今後はアルミニウム-26(^{26}Al)、塩素-36(^{36}Cl)、カルシウム-41(^{41}Ca)、ヨウ素-129(^{129}I)なども測定できる多目的タンデムAMSが有望になりつつある(中村, 2003)。特に、福島原発事故時に環境中に放出された多量のヨウ素

-131(^{131}I , 半減期: 8.02日)は現在消滅していて観測できないが、半減期の長い ^{129}I (半減期: 1570万年)を利用して当時の ^{131}I 分布を再現しようとする研究には、多目的AMSは必須な測定手法である。

ところで、 ^{10}Be は地球科学、宇宙科学、天体物理学、核科学などの分野で活用されているが、利用に当たっては半減期の正確さが特に重要である。1947年に初めてHughes *et al.* (1947)が290万年、McMillan (1947)が 250 ± 50 万年(後には 170 ± 40 万年と修正された)と報告し、Arnold (1956)はその250万年をずっと引用していた。放射線計測では半減期が長いため長時間を要するうえに精度が悪く、報告値も少なかった。1970年代になって迅速・高精度な質量分析計などの利用が可能となると、160万年や150万年前後の半減期が次々と報告されるようになり、少し前までの文献等では151万年とされた。近年になってさらに1割ほど短い報告値が登場し、 143 ± 10 万年(Fink and Smith, 2007)、 136 ± 7 万年(Nishiizumi *et al.*, 2007)、 138.8 ± 1.8 万年(Korschinek *et al.*, 2010)、 138.6 ± 1.6 万年(Chmeleff *et al.*, 2010)のように以前よりもだいたい短めな半減期が報告された。おそらくこれらが真値に近いものではないかと推定される。

さて、話題は ^{10}Be の研究例に戻るが、環境放射能研究をしている者にとって興味深い話題として、これまでの話題から一風変わってはいるものの核実験調査に利用できる可能性がある。核爆発では高速中性子が発生するが、それは大気中に存在する二酸化炭素の ^{13}C (存在比:1.11%)と反応($^{13}\text{C}(n, \alpha)^{10}\text{Be}$)して ^{10}Be を生成する(中性子捕獲反応断面積: 35 mb)。Whitehead *et al.* (2008)は、広島やカザフスタンの土壌や堆積物でバックグラウンドの2~3倍の過剰 ^{10}Be を観測しており、半減期が長いので過去の核実験活動を示す一つの指標になり得ることを示した。

5. おわりに

本論文では、環境中のベリリウムの話とその地球化学(地球科学)への応用研究を紹介しつつ、特に著者らが行っている短半減期の放射性ベリリウム同位体 ^7Be をデルタ堆積物に適用した研究例を報告した。半減期が短いことに伴う様々な測定上の困難さはつきまとうが、環境中の放射性核種を様々な事象のトレーサーとして利用し、事象解明・環境評価に応用できることを示すことができた。今後は工夫を重ねながら活用の幅をより広げていきたいと考えている。

最後に、本論文によって ^7Be をはじめとして長半減期の

^{10}Be やベリリウム元素などについて、多くの方々に関心を持っていただけることを期待したい。

文 献

- 青木賢人 (2000) ^{10}Be 露出年代法を用いた氷成堆積物の形成年代の測定 — 木曾山脈北部, 千畳敷カール・濃ヶ池カールの事例 —. 第四紀研究, **39**, 189–198.
- Arnold, J. R. (1956) Beryllium-10 produced by cosmic rays. *Science*, **124**, 584–585.
- Arnold, J. R. and Al-Salih, H. A. (1955) Beryllium-7 produced by cosmic rays. *Science*, **121**, 451–453.
- Belmarker, R., Lazar, B., Tepelyakov, N., Stein, M. and Beer, J. (2008) ^{10}Be in Lake Lisan sediments - A proxy for production or climate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **269**, 447–456.
- Bierman, P. R., Caffee, M. W., Davis, P. T., Marsella, K., Pavich, M., Colgan, P., Mickelson, D. and Larsen, J. (2002) 4 Rates and timing of earth surface processes from in situ-produced cosmogenic Be-10. *Rev. Mineral. Geochem.*, **50**, 147–205.
- Bonewitz, R. L. 著, 青木正博 訳 (2007) 岩石と宝石の大図鑑. 誠文堂新光社, 東京, 360p.
- Bourcier, L., Masson, O., Laj, P., Pichon, J. M., Paulat, P., Freney, E. and Sellegri, K. (2011) Comparative trends and seasonal variation of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs at two altitude sites in the central part of France. *J. Environ. Radioact.*, **102**, 294–301.
- Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F. and Dominik, J. (2001) Factors controlling ^7Be and ^{210}Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *J. Environ. Radioact.*, **53**, 241–256.
- Chmeleff, J., von Blanckenburg, F., Kossert, K. and Jakob, D. (2010) Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **268**, 192–199.
- 土井妙子・佐藤 純 (2004) つくばにおける大気中 ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^7Be 濃度. 第 48 回放射化学討論会, 東京, 118.
- 土井妙子・細見正明・溝口次夫・佐藤 純 (1993) つくばにおける大気中のオゾンとベリリウム - 7 の濃度変化. 天気, **40**, 827–834.
- Draganic, I. G., Draganic, Z. D. and Adloff, J.-P. 著, 松浦辰男・今村 昌・長谷川罔彦・橋本哲夫・朝野武美・小高正敏共訳 (1996) 放射線と放射能 宇宙・地球環境におけるその存在と働き. 学会出版センター, 東京, 280p.
- 海老原 充 (2005) 現代放射化学. 化学同人, 東京, 224p.
- Fink, D. and Smith, A. (2007) An inter-comparison of ^{10}Be and ^{26}Al AMS reference standards and the ^{10}Be half-life. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **259**, 600–609.
- Goel, P. S., Jha, S., Lal, D., Radhakrishna, P. and Rama (1956) Cosmic ray produced beryllium isotopes in rain water. *Nucl. Phys.*, **1**, 196–201.
- GSJ (2014) AIST 海と陸の地球化学図, <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/data/pdf/Be.pdf> (2014/02/10 確認); 産総研 地球化学図 ZOOMA Viewer Edition, <https://gbank.gsj.jp/geochemmap/zooma/land/zBe/index.html> (2014/08/10 確認)
- Hughes, D. J., Eggler, C. and Huddleston, C. M. (1947) The half-life of Be^{10} . *Phys. Rev.*, **71**, 269–269.
- IAEA (1998) Use of ^{137}Cs in the study of soil erosion and sedimentation. *IAEA, Vienna, 1998. IAEA-TECDOC-1028*, 1–123.
- Ilde, A. J. 著, 鎌谷親善・藤井清久・藤田千枝 訳 (1972) 現代科学史 1. みすず書房, 東京, 262p.
- 今井 登・寺島 滋・太田充恒・御子柴 (氏家) 真澄・岡井貴司・立花好子・富樫茂子・松久幸敬・金井 豊・上岡 晃・谷口政碩 (2004) 日本の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 209p.
- Inoue, M., Furusawa, Y., Fujimoto, K., Minakawa, M., Kofuji, H., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Yoshida, K., Nakano, Y., Hayakawa, K. and Oikawa, S. (2013) $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ ratio and ^7Be concentration in the Sea of Japan as indicators for water transport: comparison with migration pattern of Fukushima Dai-ichi NPP-derived ^{134}Cs and ^{137}Cs . *J. Environ. Radioact.*, **126**, 176–187.
- Kanai, Y. (2009) Fluxes and inventories of ^{210}Pb and ^{137}Cs in lake sediments from East Asia and their relationships to sedimentary environment. *J. Sed. Soc. Jpn.*, **68**, 91–103.

- 金井 豊 (2012) エアロゾルにより輸送された放射性核種の観測 (2011) - 福島第一原子力発電所事故に関連して - . 地質調査研究報告, **63**, 107-118.
- Kanai, Y. (2013) High activity concentrations of ^{210}Pb and ^7Be in sediments and their Histories. *J. Environ. Radioact.*, **124**, 44-49.
- 金井 豊 (2014a) ベリリウム同位体を用いる堆積学的研究. 堆積学研究, **73**, 19-26.
- 金井 豊 (2014b) 地質調査総合センターにおけるエアロゾル中の ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be の濃度変化とその堆積挙動. *Proceedings of the 15th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2014*, 印刷中.
- 金井 豊・土井妙子・榎本和義 (2013a) GSJ におけるエアロゾル中放射性核種の 2012 年観測と環境要因の再検討. 地質調査研究報告, **64**, 139-150.
- 金井 豊・斎藤文紀・田村 亨・Nguyen, V. L.・TA, T. K. O・佐藤明夫 (2013b) メコンデルタ堆積物におけるベリリウム-7, 鉛-210 及び放射性セシウム同位体の分布と堆積環境の季節変化. 地球化学, **47**, 89-100.
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U. C., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., von Gostomski, C. L., Kossert, K., Maiti, M., Poutivtsev, M. and Rimmert, A. (2010) A new value for the half-life of ^{10}Be by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **268**, 187-191.
- 厚生労働省 (2004) 特定化学物質等作業主任者テキスト. 厚生労働省安全衛生部化学物質調査課, 中央労働災害防止協会, 東京, 473p.
- Libby, W. F. (1946) Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation. *Phys. Rev.*, **69**, 671-672.
- Lundberg, L., Ticich, T., Herzog, G. F., Hughes, T., Ashley, G., Moniot, R. K., Tuniz, C., Kruse, T. and Savin, W. (1983) ^{10}Be and Be in the Maurice River-Union Lake system of southern New Jersey. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **88**, 4498-4504.
- Mabit, L., Meusburger, K., Fulajtar, E. and Alewell, C. (2013) The usefulness of ^{137}Cs as a tracer for soil erosion assessment: a critical reply to Parsons and Foster (2011). *Earth-Science Rev.*, **127**, 300-307.
- 前島勇治・永塚鎮男 (2011) 南西諸島に分布するサンゴ石灰岩上の土壌の年齢. 地球環境, **16**, 169-177.
- 松四雄騎・若狭 幸・松崎浩之・松倉公憲 (2007) 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的应用. 地形, **28**, 87-107.
- McMillan, E. M. (1947) Energy and half-life of the Be^{10} radioactivity. *Phys. Rev.*, **72**, 591-593.
- Mochizuki, I. (2012) Breaking news: 8400 Bq/Kg of lead-210 was measured from sample of Yokohama, <http://fukushima-diary.com/2012/01/fukushima-news-8400-bq-kg-lead-210-measured-sample-yokohama/> (2014/2/12 確認)
- Muller, R. A. (1977) Radioisotope dating with a cyclotron. *Science*, **196**, 489-494.
- 中村磐男・丸山裕幸・西田典子・鏡 光長・多田 治 (1979) ベリリウム合金作業場の環境測定とその評価. 産業医学, **21**, 621-622.
- 中村俊夫 (2003) I. 加速器質量分析 (AMS) による環境中およびトレーサ放射性同位体の高感度測定. *Radioisotopes*, **52**, 145-171.
- Nishiizumi, K., Imamura, M., Caffee, M. W., Southon, J. R., Finkel, R. C. and McAninch, J. (2007) Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **258**, 403-413.
- NNDC (2014) National Nuclear Data Center, NuDat 2.6, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=4&n=3> (2014/08/10 確認)
- 奥山康子 (2013a) 誕生石の鉱物科学 - 3月 アクアマリン -. GSJ 地質ニュース, **2**, 67-68.
- 奥山康子 (2013b) 誕生石の鉱物科学 - 5月 エメラルド -. GSJ 地質ニュース, **2**, 154-155.
- Parsons, A. J. and Foster, I. D. L. (2011) What can we learn about soil erosion from the use of ^{137}Cs ? *Earth-Science Rev.*, **108**, 101-113.
- Parsons, A. J. and Foster, I. D. L. (2013) The assumptions of science : a reply to Mabit *et al.* (2013) . *Earth-Science Rev.*, **127**, 308-310.
- Peters, B. (1955) Radioactive Beryllium in the Atmosphere and on the Earth. *Proc. Indian Acad. Sci., Sect. A*, **41**, 67-71.
- Renfro, A. A., Cochran, J. K. and Colle, B. A. (2013) Atmospheric fluxes of ^7Be and ^{210}Pb on monthly time-scales and during rainfall events at Stony Brook, New York (USA) . *J. Environ. Radioact.* **116**, 114-123.

- Ryan, J. G. (2002) 3 trace-element systematics of beryllium in terrestrial materials. *Rev. Mineral. Geochem.*, **50**, 121–145.
- 斎藤文紀・田中明子・田村 亨・金井 豊・西村清和・上原克人・楊 作升・王 厚杰・Nguyen, V. L.・Ta, T. K. O.・Jarupongsakul, T. (2013) メガデルタ沿岸環境保全のための観測診断技術と管理手法の開発. 平成24年度公害防止等試験研究費成果集, 9-1 – 9-49.
- Veselý, J., Norton, S. A., Skřivan, P., Majer, V., Krám, P., Navrátil, T. and Kaste, J. M. (2002) 7 Environmental Chemistry of Beryllium. *Rev. Mineral. Geochem.*, **50**, 291–317.
- von Blanckenburg, F. and Bouchez, J. (2014) River fluxes to the sea from the ocean's $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratio. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **387**, 34–43.
- 若狭 幸・松崎浩之・松倉公憲 (2004) 原位置宇宙線生成核種年代測定法: 侵食地形変化速度の解明への適用. 地形, **25**, 247–265.
- Wallbrink, P. J. and Murray, A. S. (1993) Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes. *Hydrol. Process.*, **7**, 297–304.
- Walling, D. E., He, Q. and Blake, W. (1999) Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short- and medium-term rates of water-induced erosion on agricultural land. *Water Resour. Res.*, **35**, 3865–3874.
- Wedepohl, K. H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 1217–1232.
- Weeks, M. E. and Leicester, H. M. (1968) Discovery of the elements. 7th edition. 896p. 大沼正則訳 (1988～1990) 元素発見の歴史 1～3. 朝倉書店, 東京, 996p.
- Whitehead, N. E., Endo, S., Tanaka, K., Takatsuji, T., Hoshi, M., Fukutani, S., Ditchburn, R. G. and Zondervan, A. (2008) A preliminary study on the use of ^{10}Be in forensic radioecology of nuclear explosion sites. *J. Environ. Radioact.*, **99**, 260–270.
- 横山祐典・阿瀬貴博・村澤 晃・松崎浩之 (2005) 宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究. 地質学雑誌, **111**, 693–700.

KANAI Yutaka (2014) Beryllium in the environment and its geochemical studies.

(受付:2014年7月26日)