私の研究

地球環境科学からのアプローチ

佐藤 佳子（さとう　けいこ）
桜の聖母短期大学 キャリア教養学科
准教授

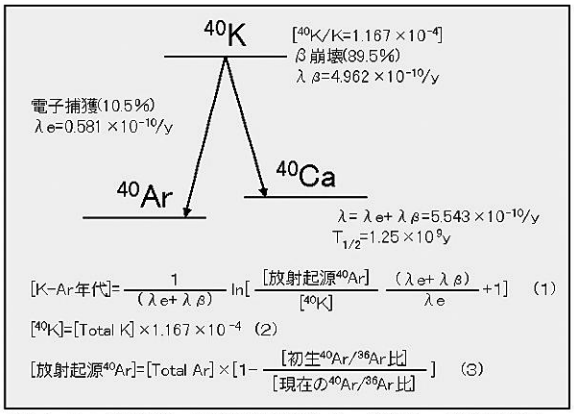
1．はじめに

地球科学というと、理科の中の地学という印象の方が多いと思うが、ひとえに地球科学分野には、気象学・天文学・地球惑星学・地震学・岩石学・鉱物学・地球化学・火山学・地質学・層序学・古生物学・災害地質学・環境科学などからなっている。それらのデータをとるためには、野外調査や探査等を含み、化学分析や物理分析が必要なため、記載や観察を含め化学・物理・生物の知識も必要になってくる。

例えば、地球の内部構造は地震波を用いて、CT スキャンのように、実際には目に見えない地球内部の層構造を解析し、コア－マントル－地殻といった、地球の層構造をトモグラフィーなどの可視化技術を用いて知ることができる。しかし、地震波における波の性質の違いにより、物理学的性質である密度や粘性などを知ることができるが、物質・組成の実際の解析には化学分析が必要になる。そこで、試料として、野外調査を行い、岩石などを採取して、光学顕微鏡による鉱物記載、X 線分析、XRF 分析や質量分析などの化学分析を行い、それらの試料の成分を解析していく。観測データや分析データは、アーカイブとして蓄えられ、そうしたデータは情報地球科学の分野ではビッグデータとして扱われ、さらなる高次分析や二次解析等に利用される。

私の専門分野というと、地球年代学や同位体地球化学を用いた、地球環境科学ということになる。地球年代学は、ある元素が放射壊変して、別の元素に変わる時間を時計として使う学問であり、別の元素に変わった量の計測から求められる同位元素の比はユニークな値となるため、環境変動の解析に使われる。前職の福島高専では、年代学や同位体と関連がある、放射化学からのアプローチとして環境動態や質量分析を用いた同位体分析などを中心とした研究を行ってきた。前々職の海洋研究開発機構（JAMSTEC）では、大学時代から引き続き、地球の環境（火山・地震・温泉・熱水・資源など）に関わる、時代変遷等について質量分析を用いた年代測定や同位元素を用いた化学分析

などから、アプローチをしてきた。中でも、希ガス（周期表の一番右側にある）に関しては、化学的に化合物を作りにくいこと、また、その性質を扱う際に物理的に扱えることなどから、トレーサー（物質の動きを見るための指標）として有効である。天然に多く存在し地球内部の熱源ともなっている、天然の放射性元素のウラン（U）からヘリウム（He）、カリウム（K）からアルゴン（Ar）が作られる（図１）。これらの同位元素の比の割合を用いて、分析解析を行っている。地球内部や外部（宇宙）からの熱の輸送により、様々な環境変動が起こるため、その熱履歴を追うことで様々な環境変動に対応することができる。



（注）λe, λβ：電子捕獲、β崩壊の壊変定数、T$_{1/2}$：半減期、y：経過時間（年）

図１　K-Ar 系年代測定法の原理

２．地球科学の分野に時間軸を入れる

身近なところでは、火山や地震が地質現象や環境変動として、いつ起こったかを考えるために、年代測定を行っている。歴史時代の変動であれば、史実などや社会現象などと共に歴史書などに記載されている。そうした災害の歴史のなかには、関東大震災のような大きな地震災害が繰り返されている裏には、富士山の噴火や、南海トラフに由来する大地震なども、ある程度の周期を伴って起こっている。歴史時代については、火山灰の同定によるテフラ年代や、花粉による年代、炭素質のものが含まれていれば炭素14法などでも年代を決定することができる。例えば、福島県であれば磐梯山の噴火や太平洋側の地震や津波などの大災害等について、時系列的にパターンなどがわかれば、数十年～数百年単位の出来事として、備えることもできよう。近年共同研究として、東北地方太平洋沖地震の際に活発になった火山活動を分析するため、炭素14法とクロスチェックできるような数千～数万年の年代を得るため、スパイクを用いないカリウム－アルゴン法の開発を行った経緯がある[1)]。

しかし、歴史時代以前の古い時代については、試料の成分を手がかりに、化学的な手法での解析が必要となってくる[2)]。ここで、天然に多く含まれているＫやＵが閉鎖形の状態（化学的擾乱が起こらない状態）での、変質などの少ない新鮮な鉱物等をサンプルとして取り出し、その成分を分析し、親元素（もとの元素）の放射崩壊による核変換で作られる娘元素（壊変によってできる元素）の比を時計として用いて、年代を決定することが必要になってくる。例えばモデル断層の年代測定とその断層熱による岩石溶融での年代リセットについで、かつての自然現象から現在の環境変動へ振り返る手がかりを得た[3)]。また、変動量や時間的変動がわかれば、今後の環境変動や災害への手がかりとなると考えられる。

一方、ベーリング海の特異な形状（引き千切ったような）のバウワーズリッジの成因論の解明では、ハワイ－天皇海山列に連なるホットスポット起源か、もしくは、太平洋プレートの沈み込みによるものかを解明した。分析手法としては、Ar-Ar 年代測定と火山岩の主要元素微量元素の化学分析により行ったが、これにより、ホットスポット起源ではないことが確定し[4)]、地質ロマンや構造地質のシミュレーションの web サイトが多数消えていった（図２）。

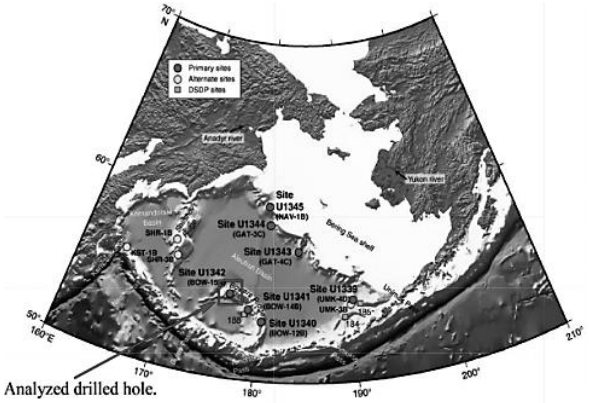


図２　ベーリング海周辺。U1342の四角周辺、弧状山脈がバウワーズリッジ。[4]

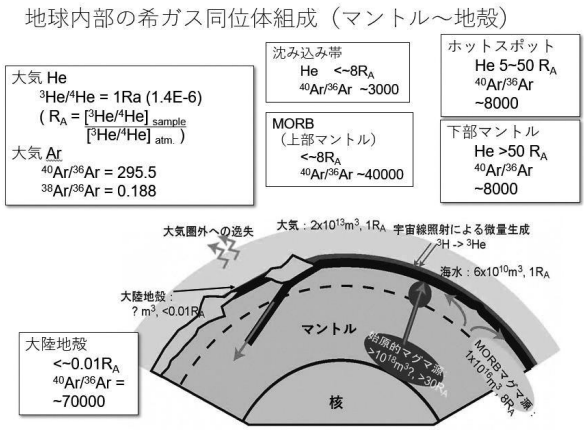


図３　地球内部の希ガス同位体組成

３．地球の環境を分析する

身近な温泉や雨水、海水、地下水なども、環境水として有効な化学指標となり得る。例えば、雨水は大気成分の粉塵などのエアロゾルの成分を内包もしくは溶解していることもあり、大気汚染の分析や環境・気象変動による大気成分の解析にも用いられる。また、海底熱水の噴出付近では資源となる鉱物やレアメタルなどが産出されるため、それらの成因分析に用いられる[5]。

一方、温泉などは地下成分を反映しているため、火山起源の成分や地質中の成分を溶かし込んでいることがある。例えば、断層起源の地震が近くで起こった場合には、断層付近の地殻内流体の成分を反映し、ある元素濃度が上昇したりするため、そこにヘリウムが含まれていて、$^3He/^4He$ 同位体比が大気の $^3He/^4He$ 同位体比より高ければ、地下深部からの熱源の関与が疑われる（図３）。そこで例えば、火山が近い場所での地震のデータもあるようなら、火山噴火準備情報として併せて検討することができる。

もちろん、地下水中のリサイクリング（循環経路や汚染経路）などを検討するために、同位体（原子核中の陽子の数は同じであるが、中性子の数が異なる核種）の比をトレーサーとして用いて、岩石や水の循環などを検討する。

近年では、地中や水に比較的よく含まれている Sr 同位体（天然の放射性同位体）や Cs 同位体（福島第一原子炉起源の同位体と天然の同位体との比）などを用いて、ワインなどの酒類[6]や農産物の産地偽装問題解決等に利用される。また、炭素14や他の同位体を用いて考古学の分野では古美術や古代遺跡等の材料に使われている元素を産地の手がかりにして同定する場合もある。

他にも環境中に共存する元素をパターン解析する方法もある。少し前の話になるが、和歌山のヒ素混入カレー事件では spring-8での放射光による蛍光Ｘ線分析方法でヒ素の重元素分析により亜砒酸の異同識別を行い混入物の違いで判別された[7]。

こうした分析は完全な非破壊分析ではないため、試料の採取が必要となり、場合によっては困難な場合もある。試料に合わせて分析法を選ぶ必要がある。

４．アーカイブの利用からデータサイエンスへ

前段で述べたような研究も続けた傍ら、前々職の海洋研究開発機構に15年程在任していた際、IODP（国際深海科学掘削計画）の研究分析データを物理解析情報、地質分析情報、化学分析情報、

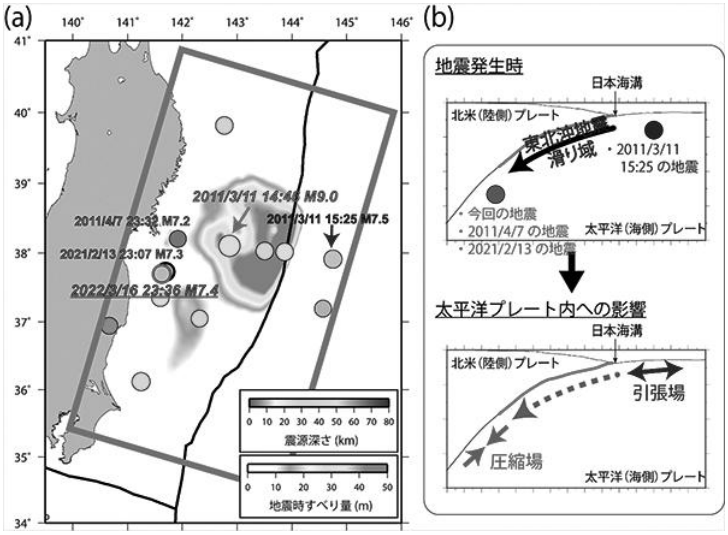


図４　東北地方太平洋沖地震の余震域[12] と、本震以降に領域内で発生したＭ７以上の地震の震央分布[11]、東北地方太平洋沖地震時の断層すべり量[13] [14]

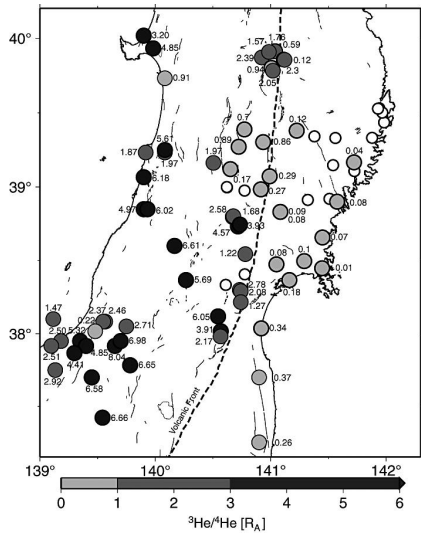


図５　東北地方太平洋沖地震以前2008年の東北地方のヘリウム同位体比[15]

アーカイブの保存も含め様々な情報を携わる部署にも所属した。そこでは、研究業務として地球化学データや地球物理データなどを可視化するため、膨大なデータを低次～高次分析結果とともに物質サンプルのアーカイブ化とは別に分析データのアーカイブ化も行っていた。

地震学は自然地震のデータ集積から様々なモデルを元に解析するため、地球科学のなかでは地理学の GPS や GIS と同様、様々なデータ処理解析が行われる。地震の震源から陸までの断面での、その地震速度の構造を解析し、構造地質的・地質学的要因と併せて解析していく。

例えば2021年２月13日の地震に関し、山本(2021)[8] によれば（図４）、福島県沖でM7.3、震源の深さ55kmの地震が発生し、気象庁は2011年の東北地方太平洋沖地震の余震と発表した[9]。

また、2022年３月16日夜、福島県沖でM7.4（気象庁暫定値：深さ57km）の地震が発生した（図４）。地震調査委員会[10] による検討の結果、今回の地震は西北西－東南東に圧縮軸をもつ逆断層型で、太平洋プレート内部で発生した地震と結論づけられた[11]。

図５にあるように、^{3}He/^{4}He 同位体比（R_A）が、2008年の岩手・宮城内陸地震の直後に測定した結果からは奥羽山脈より太平洋側のヘリウム同位体比が低くなっており、2008年時点での深部起源の関与は低いと推定された[15]。ここで2011年３月11日に発生した東北地方太平洋沖地震以降に福島県沖で発生した地震のうち、実際に被害を及ぼした地震の震央分布[16] と、2022年３月の地震から、今回の地震も東北地震の余震域内[12] において発生したものと考えられている。なお、これら過去の地震について気象庁が発表形式を変更し、この地震を東北地震の余震とは表現しなかった[17]。

このように解析結果を可視化しながら一般にも伝えることができる。ここに化学分析データや同位体データ・物理データなどを Google Earth 上に可視化するような研究も行われ[18]、先行研究の再解析などやグローバル解析がコンピュータの進化とともに広く環境が整いつつある。

５．まとめ

今日まで、地球環境科学～地球年代学のテーマを主軸に、研究手法や研究開発など、様々な研究

者と関わり、研究の幅も広がった。

地球環境という大きな舞台においては、地球年代学は時間軸を当てはめるツールとして、地球環境科学やデータサイエンスの分野は地球の環境情報の診断の役割を担っており、コンピュータの進化とともにグローバル解析を行える環境が整いつつある。

＜謝辞＞

本稿をまとめるにあたり、今までの研究に関わって頂いた、海洋研究開発機構、東京大学、京都大学、広島大学、山形大学、産総研、福島高専、アラスカ大学、ハバロフスク地物研究所、その他、たくさんの方々に感謝の意を表する。また、本稿にあたりデータ協力とご意見を頂いた海洋研究開発機構の熊谷英憲博士に感謝の意を表する。

6．引用文献

1）K. Sato et al.,(2017), IAVCEI 2017 Meeting
2）佐藤ほか（2008）地球化学，42，179－199
3）Sato et al.,(2009) Chemical Geology, 266, 96－103
4）Sato et al.,(2016) Deep Sea Research II, doi:// 10.1016/j.dsr2.2015.03.008
5）佐藤・熊谷（2020）特許第6765117号
6）Marchionni et al., J. Agric. Food Chem. 2013, 61，28，6822－6831
7）Spring-8（2018），よくあるご質問（FAQ），http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/faq/）
8）山本2021、https://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20210218/
9）気象庁、https://www.jma.go.jp/jma/press/2102/14a/kaisetsu202102140110.pdf
10）地震調査委員会、https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/20220316_fukushima_1.pdf
11）山本・吉田（2022），https://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20220318/
12）気象庁　https://www.jma.go.jp/jma/menu/yoshin_area.pdf
13）Iinuma et al., JGR Solid-Earth, https://doi.org/10.1029/2012JB009186, 2012.
14）Bird, Geochemistry Geophysics Geosystems, https://doi.org/10.1029/2001GC000252, 2003.
15）Horiguchi et al（2010）. https://doi.org/10.1111/j.1440－1738.2009.00703.x, Island Arc
16）気象庁、https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html
17）気象庁、https://www.jma.go.jp/jma/press/2203/17d/oshirase.pdf
18）YAMAGISHI Y. et al.（2011），Geochem. Geophys. Geosyst., 2011, 12, p. Q03016, doi: 10.1029/2010GC003490

＜プロフィール＞

1969年生まれ。福島県郡山市出身。博士（理学）　1988年安積女子高等学校卒業。1992年山形大学理学部地球科学科卒業。1994年山形大学大学院理学研究科地球科学専攻修士課程修了。阪神淡路大震災で被災。2000年京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了。1997～2000年大阪短期大学・南大阪大学兼任講師。2000～2001年京都大学地球熱学研究施設ポスドク等。東北地方太平洋沖地震で被災。2001～2016年国立研究開発法人海洋研究開発機構研究員・技術研究員等。2017～2021年福島工業高等専門学校化学・バイオ工学科特命准教授等（福島県へ戻り一時父の介護）。2022年桜の聖母短期大学キャリア教養学科（父永眠後、母の介助のため異動、現職）