

令和元年度廣川研究助成事業報告

鉱山開発跡地における坑廃水の対策に係る 水文調査技術の動向調査および情報収集

松本 親樹¹⁾

1. はじめに

令和元年度廣川研究助成事業により、2019年5月28日から同年6月3日の期間でチェコ共和国(以下、チェコ)にあるオストラバ工科大学(写真1)を訪問し、23rd Conference on Environment and Mineral Processing (EaMP) and workshop(以下、EaMP2019)に参加した。また、本学会の統括者でもあるVladimir 准教授を訪問し、欧州の鉱山開発跡地における坑廃水の水文調査に関する情報収集をおこなった。本稿では、今回の訪問の内容について報告する。



写真1 オストラバ工科大学構内の様子

2. 研究及びEaMP2019参加目的

坑廃水(採掘坑道から出る坑道水と集積場から出る廃水の呼称)の問題は、鉱山開発により発生する水汚染の問題であり、開発地域周辺の環境に多大な影響を与えるため、世界中で深刻な問題とされている。本問題は、石炭や金属等の資源を採掘する際に、採掘残土に含まれる硫化鉱物が酸素や水に曝されることで発生する。一度発生すると、発生源となる硫化鉱物と酸素および水の接触が妨げられない限り、半永久的に発生し続けるため、膨大な坑廃水処理コストと時間を要することになる。我が国には、およそ5,000カ所の休廃止鉱山が存在しており、そのうちおよそ79カ所の鉱山において坑廃水の処理が必要とされている(田中ほか, 2017)。坑廃水の処理には、毎年、多額の費用を要しており、この処理費用を削減することが求められている。この処理費用の削減に通じる方法として、これまで殿物造粒技術や坑道閉そく技術等、様々な方法が検討されてきた(上田・増田, 2005)。筆者はこの中でも、水文学的視点から、採掘跡である坑道内に流入する地下水等の流入量を削減する方法に着目している。しかしながら、このためには坑道内とその周辺の地下水流動をよく理解することが必要不可欠となる。

広域の地下水流動を調べる水文調査において、近年では酸素・水素の安定同位体比、放射性同位体や溶存ガス等の環境トレーサーを用いた方法が広く利用されている(松葉谷・川原谷, 2014; 井手ほか, 2016)。酸素・水素安定同位体は、1950年ごろから水文学の分野で利用され始め(Craig, 1961)、地下水流動の調査に世界中で広く利用されてきた(Huang and Wang, 2017)。我が国の休廃止鉱山においても、鉱山周辺の地下水流動の調査に適用された実績がある(奥村, 2003; 富山ほか, 2016)。しかしながら、鉱山の規模や採掘方法、降雨量や坑廃水の量等、各鉱山における環境は大きく異なるため、鉱山跡地における水文調査に必ずしも酸素・水素安定同位体比を適用できるとは限らない。鉱山跡地の水文調査における本指標の有用性や汎用性を確認するためには、更なる情報の蓄積が必要である。一方で、chlorofluorocarbons(以下、CFCs)やsulfur hexafluoride(以下、SF₆)は地下水年代の推定に利用される環境トレーサーであり、数年単位で地下水の年代を推定できる。比較的若い地下水が坑道内に流入すると予想される国内の休廃止鉱山において、その有用性が期待されるが、わが国では2000年初期より利用され始めた環境トレー

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード：坑廃水、水文調査、鉱山、同位体

サーであるため(浅井・辻村, 2010; 榊原ほか, 2017), 国内の休廃止鉱山での適用例は報告されていない。

筆者らはこれまで, 国内の休廃止鉱山において, 坑道内とその周辺の地下水流動を把握するために, 表流水および地下水の水質と酸素・水素安定同位体比に着目した水文調査を行うことで, これらの指標の有用性を示してきた(Matsumoto and Machida, 2019)。しかしながら, 上述の理由から, 鉱山跡地における CFCs と SF₆ の適用事例や, 酸素・水素安定同位体比の鉱山跡地への適用に関する更なる情報の蓄積が必要である。そこで筆者は, 自身のこれまでの研究成果の発表と欧州における坑廃水調査の情報収集を行うため, EaMP2019 が開催されたオストラバ工科大学を訪問した。

3. EaMP2019 参加報告

EaMP は, チェコのオストラバ工科大学で毎年開催されている鉱山分野に関する学会であり, 2019 年で 23 回目の開催となる。開催地であるオストラバは, 19 世紀に石炭開発や製鉄で急速に発展した都市であり, 周辺には鉱山開発に関する施設が数多く存在する(写真 2, 3)。本会議には同分野に関係する研究者・技術者が欧州を中心に世界中から 100 名以上参加するとともに, 資源開発による環境汚染, 選鉱, 資源回収, 自然エネルギー発電など鉱山・資源・エネルギーに関する幅広い分野の発表がおこなわれた(写真 4)。環境汚染に関する発表は 15 件あり, その中でも水汚染に関する発表は 6 件であった。筆者の発表も含めて坑廃水に関する発表は 2 件のみであったが, 坑廃水は世界中で生じている問題であり, 欧州においても多数報告されていることから, 多くの参加者に興味をもってもらうことができた。また, 参加者と議論を行う中で, 欧州における鉱山開発の歴史や坑廃水の現状とその対策に関する情報を収集することができた。

さらに本学会中に, オストラバ工科大学の鉱業・地質学部の副学部長であり, 本学会の統括者でもある Vladimír 准教授を訪問し, これまでの研究成果に関する議論や欧州における同様の研究事例, チェコの資源開発の歴史に関する情報収集を行うことができた。中世前期(西暦 500 ~ 1000 年)より, チェコは鉱山開発地域として有名な地域である。1875 年に Vojtech 鉱山で採掘深度が 1,000 m の深さまで到達し, 1940 年には本学会開催地であるオストラバの西に位置する Olomouch 州にある Anna 鉱山の Annenska Shaft が 1,455 m にまで達し, 当時ヨーロッパで最も深い鉱石鉱山となるなど(Grmela and Rapantova,



写真 2 オストラバの Vítkovice 地区にある製鉄所 (Dolní Vítkovice) 19 世紀に石炭開発により栄えた地域であり, それらの石炭を燃料として鉄の製造が盛んにおこなわれていた。工場を見学できるツアーがあり, 建物の上に登り, オストラバを一望できる。



写真 3 オストラバの街並み
写真右奥に見える工場地帯が写真 2 の製鉄所跡地である。ここからオストラバ工科大学までは車で 10 分ほどである。



写真 4 EaMP2019 の発表会場の様子

2005), チェコの資源開発の歴史に関して大変興味深い話を聞くことができた。

4. 欧州の鉱山開発跡地における坑廃水に関する情報

今回の訪問中に、チェコおよび欧州の資源開発の歴史や同位体を用いた研究事例に関して、参考となる数多くの論文や書籍の情報を入手することができた。その中でも筆者の研究に密接に関係する情報を以下にまとめた。

チェコでは中世前期(西暦 500 ~ 1000 年)より、金、銀、銅、錫やタングステン等の金属や石炭資源の開発が行われてきた(Grmela and Rapantova, 2005)。現在では鉱石を採掘していたすべての鉱山が閉山し、石炭鉱山の数も減少している。石炭に関しては、オストラバが位置する上部 Silesian 炭田の一部で坑内掘り採掘が現在でも行われており、露天掘り採掘はチェコの首都であるプラハの北西付近に位置する Podkrušnohoří と呼ばれる地域で行われているのみである。そのほかには、セメントやレンガ、ガラス等の原料が採掘されている。

坑廃水の問題は、数多く報告されており、チェコ国内の主要な環境問題のひとつとされている。例えば、上部 Silesian 炭田の無煙炭採掘地や Podkrušnohoří 地域における褐炭採掘地からの坑廃水である。上部 Silesian 炭田における坑廃水は塩水の水質を示し(Bondaruk *et al.*, 2015)、坑廃水中に多量の Cl⁻ や Na⁺、SO₄²⁻ を含んでいる。チェコでは、操業が終了したほとんどの石炭鉱山の採掘跡は、雨水や地下水などで浸水した状態になる。これにより、採掘残壁から採掘跡を満たす水に重金属等の汚染物質が溶出し、鉱山跡地から汚染された坑廃水が発生する。このように、過去に開発された鉱山や現在も操業が行われている鉱山から坑廃水が継続的に発生しており、今もなおそれらの対策が行われている状態である。

筆者らが日本国内の休廃止鉱山における水文調査で利用した酸素・水素安定同位体比は、欧州の鉱山地域ではすでに数多くの地域で適用されている。Rózkowski and Przewłocki (1974) は、ポーランドに位置する Lublin 炭田と上部 Silesian 炭田において、酸素・水素安定同位体比を用いた水文調査を実施することで、地下坑道への流入水の種類や経路を調査した。Hubbard *et al.* (2009) は、坑廃水の発生場所として世界的に有名なスペインの Rio Tinto 川において、水と硫酸の酸素同位体比に着目し、フィールドスケールでの硫化物酸化のメカニズムを調べている。また、Hofmann *et al.* (2008) は、ドイツの東部に位置する Lusatian 褐炭採掘地域の集水エリアにおいて、酸素・

水素安定同位体比を利用して水収支を計算した。さらに、Seebach *et al.* (2010) は、同地域の露天掘り採掘跡地に形成された部分循環湖において、酸素同位体比とトリチウム、SF₆ を利用し、湖水と周辺地下水の相互作用およびそれぞれの年代を議論した。このように、酸素・水素安定同位体比や日本国内での休廃止鉱山における適用事例が報告されていない CFCs や SF₆ などの環境トレーサーを用いた坑廃水に関する研究事例は、欧州でいくつか報告されていることが分かった。さらに、坑内掘り鉱山跡地の水文調査におけるそれらの環境トレーサーの有用性についてまとめた情報も公開されていた(Wolkersdorfer, 2008)。

以上のような欧州における事例から、日本国内の休廃止鉱山の坑廃水に関する研究においても CFCs や SF₆ を適用することは十分に可能であるといえる。しかしながら、日本の休廃止鉱山の多くが山間部に位置しており、その周辺に工業関連施設や火成岩、温泉等がある場合には、工業地域での CFCs 付加や自然起因の SF₆ 付加が年代推定に影響を及ぼす(浅井・辻村, 2010; 榊原ほか, 2017)。そのため、上述の環境トレーサーを必ずしも日本国内の鉱山跡地に適用できるとは限らない。したがって、今回の訪問により得られた知見やこれまでの研究結果を基に、今後は日本国内の休廃止鉱山での研究事例を増やしていく計画である。

5. おわりに

今回の訪問では、世界中から集まった鉱山開発分野に関係する研究者・技術者の方々と様々なテーマに関して議論する機会を得ることができ、非常に貴重な経験をさせていただいた。また、その中で鉱山開発に由来する環境問題に関する研究に益々興味を持つことができ、研究意欲の向上につながった。文献等で情報を得るだけでなく、実際に現地の方々のお話を聞くことで、その地域の歴史の重みや環境問題の深刻さ等を肌で感じることができ、貴重な経験となった。

謝辞: 今回の訪問を快諾していただきました、オストラバ工科大学の鉱業・地質学部の Vladimír 准教授に感謝の意を表します。また、廣川研究助成事業により今回の渡航を実現することができました。最後に、このような機会をいただきました関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

文 献

浅井和由・辻村真貴(2010)トレーサーを用いた若い地下

- 水の年代推定法—火山地域の湧水へのCFCs年代推定法の適用—. 日本水文科学会誌, **39**, 67-78.
- Bondaruk J., Janson E., Wysocka M. and Chałupnik S. (2015) Identification of hazards for water environment in the Upper Silesian coal basin caused by the discharge of salt mine water containing particularly harmful substances and radionuclides. *Journal of Sustainable Mining*, **14**, 179-187.
- Craig H. (1961) Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Grmela A. and Rapantova N. (2005) Mine water issues in the Czech Republic. In Wolkersdorfer, Ch. and Bowell, R., eds., *Contemporary reviews of mine water studies in Europe, part 2. Mine Water and the Environment*, **24**, 31-33.
- Hofmann H., Knöller K. and Lessmann D. (2008) Mining lakes as groundwater-dominated hydrological systems: assessment of the water balance of Mininig Lake Plessa 117 (Lusatia, Germany) using stable isotopes. *Hydrological Processes*, **22**, 4620-4627.
- Huang P. and Wang X. (2017) Applying environmental isotope theory to groundwater recharge in the Jiaozuo mining area, China. *Geofluids*, **2017**, 1-11.
- Hubbard C. G., Black S. and Coleman M.L. (2009) Aqueous geochemistry and oxygen isotope compositions of acid mine drainage from the Río Tinto, SW Spain, highlight inconsistencies in current models. *Chemical Geology*, **265**, 321-334.
- 井手 浄・利部 慎・細野高啓・嶋田 純 (2016) 繰り返し採水試料のCFCs (クロロフルオロカーボン類) による霧島火山群湧水の滞留時間推定—Lumped parameter model による年代解析—. 日本水文科学会誌, **46**, 213-231.
- 松葉谷 治・川原谷 浩 (2014) 水素・酸素同位体比から見た地下水, 河川水及び降水の関係—秋田における若干の観測結果についての考察—. 地下水学会誌, **56**, 309-320.
- Matsumoto S. and Machida I. (2019) Investigation of groundwater flow using $\delta^{18}\text{O}$ and δD in a sulfur mine in Japan. *Proceedings of 23th International Conference on Environment and Mineral Processing workshop Waste-Secondary Raw Materials*, 151-158.
- 奥村維男 (2003) 旧松尾鉱山 3M 坑道水の水文地化学的調査・解析. 資源地質, **53**, 173-182.
- Rózkowski A. and Przewłocki K. (1974) Application of stable environmental isotopes in mine hydrogeology taking Polish coal basins as an example. *Proceedings of Symposium on Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, 481-501.
- 榊原厚一・辻村真貴・浅井和由 (2017) フッ化硫黄 (SF₆) を用いた地下水の滞留時間推定における課題と展望. 地下水学会誌, **59**, 87-103.
- Seebach A., Rohden C., Ilmberger J. Weise S. M. and Knöller K. (2010) Dating problems with selected mining lakes and the adjacent groundwater body in Lusatia, Germany. *Isotopes Environ Health Studies*, **46**, 291-298.
- 田中 勝・青山 勲・石坂 薫・大畑ゆき・福池伊織・川瀬啓一・渡邊雅範・時澤孝之・宮川 洋・石森 有 (2017) リスクコミュニケーション実施上の課題の研究. JAEA-Research 2017-003, 65p. doi:10.11484/jaea-research-2017-003.
- 富山真吾・五十嵐 敏文・井伊博行・高野日出男 (2016) 地球化学的手法と数値解析を用いた下川鉱山坑内水の起源推定. *Journal of MMIJ*, **132**, 80-88.
- 上田英之・増田信行 (2005) 坑廃水処理コストの分析と鉱害防止技術開発. 資源と素材, **121**, 323-329.
- Wolkersdorfer C. (2008) *Water management at abandoned flooded underground mines—fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment, berlin—*. Springer, Heidelberg, 466p.

MATSUMOTO Shinji (2020) Report of the Hirokawa Research Fund in the 2019 fiscal year: Report of 23rd Conference on Environment and Mineral Processing (EaMP) and workshop 2019 to collect information on Acid Mine Drainage in closed mines and the hydrological research in European countries.

(受付: 2020年3月17日)