特集号「岩石-水相互作用の研究の発展と鹿園直建会員」緒言

Special issue “Development of researches on rock–water interaction and Professor Naotatsu Shikazono” Preface

藤本光一郎(Koichiro FUJIMOTO)*

奥山 康子(Yasuko OKUYAMA)**

土屋 範芳(Noriyoshi TSUCHIYA)***

This Special issue is devoted to the late professor Naotatsu Shikazono (1946–2014) for his great contribution to the development of the researches on rock–water interaction. The issue includes five review papers covering wide topics concerning rock–water interaction. They are Lithium resources, global carbon cycle modeling, reactive transport simulation, clay mineral–water systems and pottery stone deposits. The authors are colleagues or disciples of Professor Shikazono. The papers will signify his important role to the development of researches on rock–water interaction.

Keywords: Water–rock interaction, Hydrothermal deposits, Professor Shikazono

I. 特集号の主旨

鉱物科学会岩石-水相互作用研究部会では、2008年の年会より「岩石-水相互作用」のセッションを継続して開催し、原理的・基礎的な側面から、廃棄物処分や二酸化炭素地中貯留のような応用的な側面まで様々な内容を扱ってきた。2009年にはセッション講演を元にして特集号「岩石-水相互作用から見る二酸化炭素地中貯留」が、岩石鉱物科学第38巻4号および5号として出されている。2014年の熊本大学での年会においては研究部会の発足時からのメンバーであり、この学際領域的分野に対して多大な貢献をし、同年4月22日に67歳で急逝された鹿園直建会員を追悼する講演を企画した。

2014年年会の「岩石-水相互作用」のセッションでは鹿園会員とゆかりの深い本学会員およびセッションを共催した資源地質学会の会員によって6件の講演が行われ、多彩な分野から岩石-水相互作用というキーワードの元に最先端のトピックスが紹介された。セッションコンビナーでもある私たちはこの内容を岩石鉱物科学の特集号でまとめる

ことができれば、鹿園会員の功績をたたえるのみならず、多くの会員に岩石-水相互作用の研究の現状を俯瞰する材料を提供できると考え、特集号を企画することとした。

この緒言では、特集号の概要を述べるとともに、金属鉱床学にとどまらずに、岩石鉱物学・地球化学の立場から放射性廃棄物や二酸化炭素地中貯留など環境問題にかかわる学問領域にも大きく貢献された鹿園会員の功績と岩石-水相互作用の研究の歩みを簡単に振り返りたい。

II. 特集号掲載論文の概要

本特集号は以下の5編の総説から構成されている。いずれの著者も鹿園会員とゆかりが深く、それぞれの方の進めてきた研究テーマについて自身の研究を踏まえて解説をしている。

荒岡大輔：リチウム資源とリチウム同位体

柏木洋彦、鹿園直建：顕生代におけるグローバル炭素循環モデル

竹野直人：反応-輸送数値シミュレーションとその背景

河村雄行：粘土鉱物-水系の実験と分子シミュレーション

doi: 10.2465/gkk.150901

(平成27年9月1日受付, 平成27年9月15日受理, 担当編集委員: 木村 眞)

* 東京学芸大学教育学部環境科学分野 〒184-8501 小金井市貫井北町4-1-1

** 国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質標本館 〒305-8567 つくば市東1-1-1

*** 東北大学大学院環境科学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20

* Department of Environmental Sciences, Faculty of Education, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukui-Kita, Koganei, Tokyo 184-8501, Japan E-mail: koichiro@u-gakugei.ac.jp

** Geological Museum, Geological Survey of Japan, AIST, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: okuyama-gsj@aist.go.jp

*** Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aoba 6-6-20, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan E-mail: tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

ン

武内浩一：天草陶石鉱床の生成環境に関する考察

以下、各論文の概要を紹介する。

荒岡論文は、イオン電池などで近年需要の増しているリチウム資源について、塩湖かん水型リチウム鉱床、ペグマタイト型リチウム鉱床、堆積型リチウム鉱床などの鉱床タイプについて概観し、鉱床の成因解明にとって重要なツールとなり、著者の専門でもあるリチウム同位体を用いたリチウム鉱床成因論についての最新の動向を解説している。

柏木、鹿園論文は、地質時代の大気中の二酸化炭素濃度を推定する手法として有効なグローバル炭素循環の数値シミュレーションモデルについて解説している。顕生代(約5億4000万年前から現在まで)の二酸化炭素濃度変化を良好に再現することで知られている **GEOCARB** モデルを中心に、理論的な定式化について解説するとともに、多様なパラメータの評価や計算結果に及ぼす影響について、風化量や脱ガス量に関する著者の研究も踏まえて議論をしている。

竹野論文は、地層と地下水の相互作用を定量的に解析する上で今日では不可欠なツールとなっている反応-輸送数値シミュレーションについて解説している。まず、反応計算の元となっている熱力学データや反応計算コードについて述べ、その上で地下水の流動や熱輸送をカップリングさせる方法についての基本的な考え方を解説している。さらに水理-熱-化学反応をカップリングさせた **H-T-C** シミュレーションコードのうち代表的な4つのコードについて、その特徴を比較し、課題や展望を述べている。特に地殻の主要元素である **Al** の挙動と熱力学データの整合性の問題は以前から課題とされてきているが、現在においても第一の課題としてあげていることは特筆される。

河村論文は、著者たちが開発してきた分子シミュレーション法を用いた粘土鉱物の特性と組成・構造の系統性を明らかにする研究を紹介している。粘土鉱物は地球表層の主要な構成物であり、材料的な観点のみならず、環境への影響、断層運動の際の潤滑剤としての役割など様々な局面で重要な役割を果たしている。しかし粘土鉱物は粒子サイズが小さく、水と複雑な系を作るために実験的な研究が困難な対象であるため著者たちの進めているシミュレーション的研究は不可欠であり、本論文はその格好の案内となっている。

武内論文は、国内の代表的な陶石鉱床であり、著者が長年研究をしている熊本県の日田陶石鉱床について、地質的背景や陶石の鉱物学的特徴や鉱床成因論に関するこれまでの研究を概観している。そのうえで著者の分析データも加えて生成時の地温勾配や水岩石比などから日田陶石鉱床の成因モデルに制約条件を与えるとともに、日田陶石鉱床も含めた陶石鉱床生成の類型化を提案している。

III. 岩石-水相互作用と鹿園会員

岩石-水相互作用と水-岩石相互作用という言葉はどちらもほぼ同じように使われている。当初は国際シンポジウムの名称や地下水や熱水を扱う地球化学系の研究者が中心的役割を果たしてきたこともあり、水-岩石相互作用が多く使われていたが、近年は岩石鉱物系の研究者の関心も高まり、岩石-水相互作用という言い方も一般的になっている。最初に述べた鉱物科学会の研究部会の名称も岩石-水相互作用を使っている。

国内において岩石と水の相互作用という概念は、1974年以降定期的に開催されている国際水-岩石相互作用シンポジウム(**WRI** シンポジウム)の主要メンバーでもあった関陽太郎氏(当時埼玉大)、酒井均氏(当時岡山大学温泉研究所)たちが紹介したことから徐々に広まったのではないと思う。当時の状況については以下の文献(たとえば関・大木(1974)、関(1977)、酒井ら(1982))を参照されたい。さらに、1983年に鳥取県の三朝で酒井氏を実行委員長として4回目の **WRI** シンポジウムが開催され、世界の一線の研究者や国内の研究者総勢200名以上が集まり、国内の中堅若手の研究者に大きな刺激を与えてこの研究分野を活性化させる大きな一因となった。鹿園会員ももちろん三朝のシンポジウムに参加されている。

世界的には1960年代から地熱水の起源、熱水鉱床形成、海水の化学組成や物質収支などをめぐる問題から、様々な岩石と熱水の反応実験や熱力学的計算が行われた。とりわけ1970年代後半から1980年代にかけて、中央海嶺の探査の進展とも関わり、玄武岩と海水の相互作用の研究が一世を風靡し、地球化学系の雑誌には毎号のように新しい実験結果や計算結果、天然試料との比較検討などが掲載されていた。

一方、地下水の水質や鉱山付近の水質汚染などと関連して土壌や構成鉱物の水への溶解や溶脱成分の移動は重要なテーマであった。地下水の水質を再現するために、様々な鉱物の溶解実験が行われ反応速度が求められたが、実験で求められた反応速度と実際の地下水の水質や水理モデルから見積もられた反応速度には数ケタ実験の方が大きいという問題もあり、これも大きなトピックとなっていた。この問題については、鹿園(2010)に詳しい。

火成作用、変成作用など地殻深部の現象においても流体の役割の重要性は徐々に認識されてきた。従来それぞれの領域で個別に行なわれてきた岩石と水の相互作用の問題を、**Water-Rock Interaction** という言葉でまとめて議論しようとして始められたのが **WRI** シンポジウムである。またカナダの **Fyfe** 氏たちによる **Fluids in the Earth's Crust** (**Fyfe et al., 1978**)は、地球化学と地質学(構造地質学)、地球物理学を学際的に横断して地殻内の流体について初めて体系的に論じた現在でも通用する教科書であり、その後の研究に大きな影響を与えた。

WRI シンポジウムは、1974 年の第一回以降、2013 年の第 13 回まで 3 年おきに開催されている。参加人数も当初より増え、扱うテーマも基礎的な風化や変質、マグマプロセス、水質汚染などに関連するもの以外に、年々増え続けており、地球環境に関連するテーマや生命科学と関連するテーマなどが特に増えている。また、国内における地球科学系、特に固体地球科学系の学会においてセッション名などに水や流体という言葉の入ったものが近年目立つようになっており、大型のプロジェクト研究なども流体や水がキーワードとしてはいつていることが多い。20 年ほど前には考えられなかった状況であり、隔世の感がある。

鹿園会員の本格的な研究は東京大学理学部の地質学教室鉱床学講座で国内の熱水鉱床の研究からスタートした。鉱物を沈殿させる熱水に強い関心を寄せており、最初の学術論文は 1972 年の「熱水溶液中における硫化鉱物の溶解度」であった。また、熱水鉱床のアナログとして活動的地熱地帯に強い関心を持って重要なレビューを書かれた。鉱床鉱物に関心が行きがちになる中、熱水に着目した研究は熱水鉱床の研究に新たな側面を切り開いたものであり、先に紹介した関(1977)にも鹿園会員の初期の論文が鉱床学の代表例として挙げられている(鹿園, 1976a, 1976b)。また、1979 年から 2 年間ハーバード大学の Holland 氏の研究室で、海底熱水鉱床で多く産出する硫酸塩鉱物に着目されて実験や解析を行い(Shikazono and Holland, 1983, Shikazono *et al.*, 1983, Shikazono, 1994)、巨視的な自然現象の中で微視的な素過程を重視する研究手法や問題意識に磨きをかけられた。

1990 年に慶應義塾大学に移られてからは鉱床にとどまらずに放射性廃棄物・二酸化炭素地中貯蔵や地下水、グローバルな物質循環など幅広い領域にわたって多くの学生・院生とともに活発な研究を展開された。それは、先に紹介した WRI シンポジウムのテーマの広がりにも対応するものである。鹿園会員の論文リストを眺めると 200 編以上、しかもその半数は単著および筆頭著者という数にも圧倒されるが、掲載する雑誌の分野の広さにも驚かされる。また、フィールドでの観察、分析、実験、理論の総合化を重視し、分子原子レベルからグローバルな現象まで貪欲なまでに研究対象とする点は研究開始時から終始一貫した学風と言えよう。教科書執筆も旺盛に行われ「地球システムの化学」(鹿園, 1997)やその新版ともいえる「地球システム環境化学」(鹿園, 2010)は他に類のない岩石-水相互作用の本格的な教科書となっている。

IV. 終わりに

このように振り返ってみると、鹿園会員の 40 年以上の研究は、岩石-水相互作用の研究が日本に定着し、盛んになってきた歩みと密接に関わるものであり、その流れをリードされてきたことがよくわかる。改めて鹿園会員のご冥福をお祈りするとともに、学問領域の発展に対する大きな貢献に対して感謝の気持ちを捧げたい。本特集号により、多くの会員が岩石-水相互作用の研究への関心を深めていただければ幸いである。

謝 辞 岩石鉱物科学編集委員会には、本特集号の企画を認めていただいた。また、本特集号の掲載論文の査読は、担当編集委員以外に 6 名の方が担当された。深く感謝したい。また、鹿園会員に関連する情報をいろいろ提供いただいた、東京大学総合研究博物館の島崎英彦氏、清田馨氏および東京学芸大学教育学部中田正隆氏に感謝申し上げたい。

引用文献

- Fyfe, W.S., Price, N.J. and Thompson, A.B. (1978): Fluids in the earth's crust. pp. 383, Elsevier, Amsterdam.
- 酒井 均, 関陽太郎, 田口一雄(1982): 水・岩石相互作用(WRI)研究グループの現状と WRI 第 3 回国際シンポジウムについて. 岩鉱, 77, 104-107.
- 関陽太郎(1977): 水・岩石相互作用の研究をめぐる状況. 科学, 47, 770-772.
- 関陽太郎, 大木靖衛(1974): 水-岩石相互作用シンポジウム. 科学, 44, 772-774.
- 鹿園直建(1972): 熱水溶液中における硫化鉱物の溶解度. 鉱山地質, 22, 403-412.
- 鹿園直建(1976a): 黒鉱鉱液の化学組成. 岩鉱, 71, 201-215.
- 鹿園直建(1976b): 鉱化溶液の性質と鉱床の生成機構. 鉱山地質, 7, 117-131.
- Shikazono, N. (1994): Precipitation mechanisms of barite in sulfate-sulfide deposits in back-arc basins. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 2203-2213.
- 鹿園直建(1997): 地球システムの化学. pp. 319, 東京大学出版会.
- 鹿園直建(2010): 地球システム環境化学. pp. 266, 東京大学出版会.
- Shikazono, N. and Holland, H.D. (1983): The partitioning of strontium between anhydrite and aqueous solutions from 150 to 250 °C. *Econ. Geol. Monog.*, 5, 320-328.
- Shikazono, N., Holland, H.D. and Quirk, R.F. (1983): Anhydrite in Kuroko deposits: mode of occurrence and depositional mechanisms. *Econ. Geol. Monog.*, 5, 329-344.