

# アタカマ塩湖：リチウムの世界最大の宝庫

小島 晶 二<sup>1)</sup>

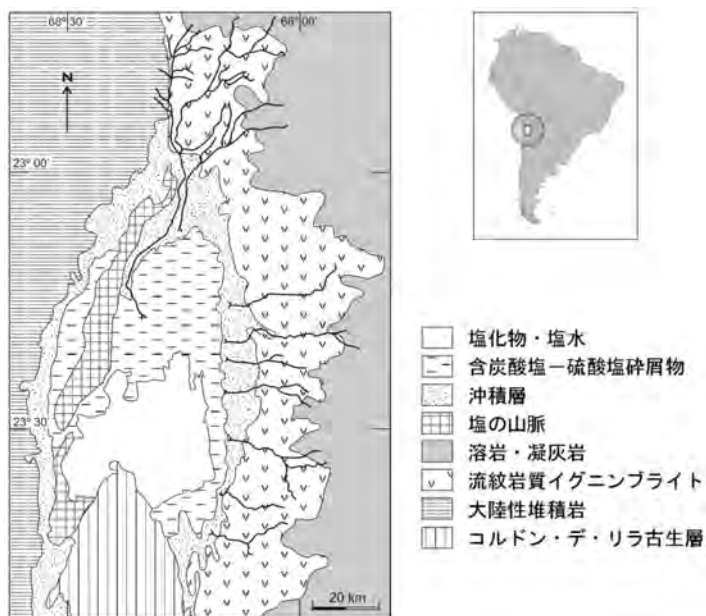
## 1. はじめに

チリといえば世界最大の銅産出国として有名で、2006年の時点で総生産量536万トンで世界の年間生産量の35.2%を占める。さらにチリは銅の他にモリブデン、金、レニウム等の重金属資源についても世界有数の生産国である。こうした重金属資源に加えチリでは近年非金属元素を含む希元素の採取が進み、リチウム(世界第1位、年間生産量8,000トン)、ヨウ素(世界第1位、年間生産量15,500トン)及びホウ素(世界第3位、年間生産量528トン)等の世界有数の資源国としても知られている。これらの元素は主に北部砂漠地帯の塩湖に濃集しており、チリの重要な輸出品としての地位を確保している。その中でリチウム(Li)は最も軽い金属でイオン化傾向が大きいことから、リチウムイオン電池として需要が伸び、特に最近話題になっ

ている環境にやさしい電気自動車のバッテリーの原料として不可欠な資源となった。チリにおける最大のリチウム鉱床は観光地としても名高いアタカマ塩湖である(大迫, 1992)。そこで本稿ではアタカマ塩湖のリチウム資源及びその地質学的特徴について概観し、塩湖の生成年代やリチウムの起源についての最近の研究動向を紹介する。

## 2. アタカマ塩湖のリチウム資源

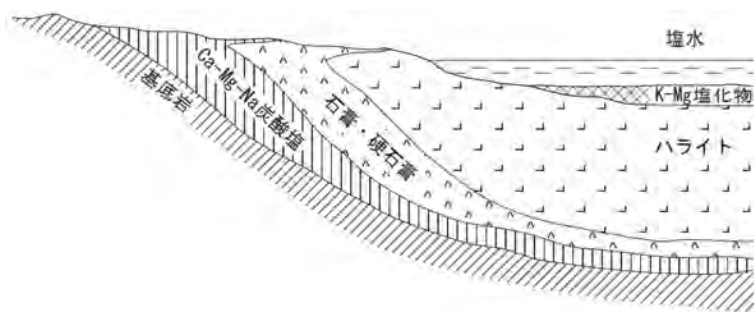
チリ第2州、世界有数の斑岩銅鉱床であるチュキカマタ、エスコンディーダ両鉱床の中間の緯度に位置する世界第2位のアタカマ塩湖は琵琶湖の5倍の面積を有し、チリ最古の集落とされるサンペドロ・デ・アタカマ(西経68°12′, 南緯22°55′)の南方のくぼ地に広がる(第1図)。塩湖は結晶化した塩類とかん水(brine)



第1図  
アタカマ塩湖周辺の地質概略図 (Boric et al., 1990; Alonso and Risacher, 1996)。太線は河川を示す。

1) チリ, アントファガスタ市, Catolica del Norte 大学

キーワード: アタカマ塩湖, リチウム, かん水, イグニンプライト, チリ



第2図 アタカマ塩湖の模式断面図 (Vila, 1986の図を一部修正).

から成り、リチウムは主にかん水中に塩化物として溶解する。その濃度は0.14-0.16%にも達し、アンデス西方に位置する他の巨大塩湖、例えばボリビアのウユニ塩湖 (0.025% Li) やアルゼンチンのオンブレ・ムエルト塩湖 (0.07% Li) に比し極めて高濃度のLiを溶解する (Chong *et al.*, 2007)。結晶化した塩類は主にアルカリ・アルカリ土類金属 (Na, K, Ca) の塩化物、硫酸塩及び炭酸塩から成り、塩湖の水平・垂直方向に沿った累帯構造を示す (第1, 2図)。即ち溶解度の低い炭酸塩・硫酸塩 (方解石, 石膏・硬石膏) が塩湖の周辺部並びに深部に卓越し、溶解度の高い塩化物 (ハライト, シルビン) は塩湖の中央部並びに浅所に産出する (Vila, 1986; Alonso and Risacher, 1996)。その塩化物域に囲まれる形でかん水は存在し、かん水から得られたリチウムは主に炭酸塩または塩化物として輸出されている (Chong *et al.*, 2007)。

### 3. アタカマ塩湖の地質と形成史

アンデス山脈前縁部のベースンに位置するアタカマ塩湖周辺の地質は表層部の沖積層を除けば、西部域は漸新世から中新世初期の大陸性堆積物から成り、その他の周縁部では中新世以降に厚く堆積した流紋岩質の凝灰岩、いわゆるイグニンプライトにより構成される (ちなみに最近話題となっているALMAプロジェクトによる多数の電波望遠鏡群はこのイグニンプライト層の上に建設される)。塩湖西口には上述した大陸性堆積物が塩と混在し、特異な景観を呈するコルディレラ・デ・ラサル (塩の山脈) が形成されている (第1図)。またコルドン・デ・リラ (Cordón de Lila) と呼ばれる塩湖南域には主にオルドビス紀から二疊紀にかけて生じた安山岩質火山岩、海成堆積物及び花崗岩

質貫入岩が特徴的に露出する (Zimmerman *et al.*, in press)。

近接するイグニンプライトはアタカマ塩湖の周辺部を取り囲む様な形で分布していることから、初期の湖はイグニンプライトの堆積直後にその形成が始まったと考えられる。アタカマ砂漠に出現するイグニンプライトを含む火山岩類は24-18Maの絶対年代を示すので (Boric *et al.*, 1990),

初生アタカマ湖は前期中新世に形成されたことになる。この年代は北部の主要斑岩銅鉱床の浅成富化鉱化作用の時期と重なる (Alpers and Brimhall, 1988; Sillitoe and McKee, 1996)。従って、この時期のアタカマ湖は満々と水をたたえていたのではないだろうか。それでは砂漠化によってその水がいつ蒸発して現在のような塩湖に変化したのであろうか。この点に関しては初期中新世 (~25Ma; Dunai *et al.*, 2005) から後期鮮新世 (8-3Ma; Hartley and Chong, 2002) まで様々な年代が示唆されており、研究者の分野や研究方法によって大きく異なる。Dunai *et al.* (2005) は宇宙線照射生成核種を表層侵食に適用し、Hartley and Chong (2002) は蒸発岩中に介在する碎屑岩層中の黒雲母の絶対年代による年代層位学的手法を用いている。著者の専門である鉱床学の分野では斑岩銅鉱床の2次酸化帯に産する明礬石等を用いて推定された浅成富化鉱化作用の絶対年代から、中期中新世 (~14Ma) の可能性が指摘されている (Alpers and Brimhall, 1988; Sillitoe and McKee, 1996)。これら全ては間接的なデータであり、アタカマ塩湖堆積物に直接適用した研究ではない。もし塩湖堆積物に何らかの年代学的方法を適用すれば、ボリビアのウユニ塩湖で示唆されたようなより若い年代値が得られるかもしれない (Fornari *et al.*, 2001)。何れにせよ地殻の厚化に伴うアンデス山脈の形成及びそれに起因する半乾燥気候から超乾燥気候への変化に伴う湖水の蒸発によりかん水中のリチウムが次第に濃集したと考えられる。

### 4. リチウムの起源

塩湖から産するリチウムの起源は地質家にとって

最大の関心事項であろう。この点に関しては周囲が漸新世以後の火山岩によって覆われていることから、他の金属元素と同様に周辺の火山岩に起源を求める研究者が多い。本地域の第三紀の珪質火山岩は平均33.4-35.3ppmのリチウムを含有することが知られており、これらの値は地殻存在度(20ppm)より高い(Vila, 1986)。また塩湖の東部・北部域ではイグニンプライトを横切る形で数多くの河川水が塩湖に注いでおり(第1図)、それらは平均1.5ppmのリチウムを溶存する(Alonso and Risacher, 1996)。これらのデータは珪質火山岩中のリチウムが地表水によって溶脱されたとする火山岩起源説を支持する。サンペドロ・デ・アタカマの北方にはいくつかの温泉が知られており、約70km北方に位置するエル・タティオの地熱水及び温泉水で30-40ppm程度の高濃度リチウムが確認されている(Ellis and Mahon, 1977; Giggenbach, 1978; Cortecchi *et al.*, 2005)。温泉水は河川水より高温なので、岩石との相互作用によるリチウムの溶脱がより顕著に生じる可能性が高い。従って、河川水だけではなく温泉水を含めた地表水によってリチウムが火山岩から溶脱されたと考える方が妥当かもしれない(Garret, 2004)。

アタカマ塩湖かん水中のLi量はカリウム(K)・ホウ素(B)両元素の量と0.9以上の高い相関係数を示し、これらの元素に対する同一の起源が示唆される(Vila, 1986; Alonso and Risacher, 1996)。従って、Li, K, Bの3元素は塩湖の周囲を取り囲む珪質火山岩類の風化・溶脱を経てかん水中に貯蔵されたと推定される。一方、Na, Ca, Cl及びSO<sub>4</sub>は上記元素と明瞭な相関関係を示さないで、珪質火山岩類だけではなくより古い大陸性堆積物から付随的に富化されたと考えられている(Alonso and Risacher, 1996)。このように、LiとBが同一の起源に由来すると判断されるのであれば、かん水と共存するホウ素鉱物の安定同位体(<sup>11</sup>B/<sup>10</sup>B)等のデータからその起源がより明らかになるかもしれない。今後はこうした研究の進展が望まれる。

謝辞：産総研の石原舜三、村上浩康両博士からはリチウム資源の論文や現状に関する数々のご教授をいただいた。また、北カトリック大学のレオネル・ホフレ氏には図の作成においてお手を煩わせた。以上の方々に感謝申し上げます。

## 文 献

- Alonso, H. and Risacher, F. (1996) : Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geol. Chile*, 23, 113-122.
- Alpers, C.N. and Brimhall, G.H. (1988) : Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 100, 1640-1656.
- Boric, R., Díaz, F. and Maksiav, V. (1990) : Geología y Yacimientos Metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Bol. 40, 246p.
- Chong, G., Gajardo, A., Hartley, A.J. and Moreno, T. (2007) : Industrial minerals and rocks. In Moreno, T. and Gibsons, W. (eds.) *The Geology of Chile*. The Geological Society, Bath, 201-214.
- Cortecchi, G., Boschetti, T., Mussi, M., Herrera, C., Mucchino, C. and Barbieri, M. (2005) : New chemical and isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochem. Jour.*, 39, 547-571.
- Dunai, T.J., González, G. and Juez-Larré, J. (2005) : Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology*, 33, 321-324.
- Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J. (1977) : *Chemistry and Geothermal Systems*, Academic Press, 392p.
- Fornari, M., Risacher, F. and Féraud, G. (2001) : Dating of paleolakes in the central Altiplano of Bolivia. *Paleogeogr. Paleoclimat. Paleocol.*, 172, 269-282.
- Garret, D.E. (2004) : *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride: Their Deposits, Processing, Uses and Properties*, Elsevier, 476p.
- Giggenbach, W.F. (1978) : The isotopic composition of waters from the El Tatio geothermal field, Northern Chile. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 979-988.
- Hartley, A.J. and Chong, G. (2002) : Late Pliocene age for the Atacama Desert: Implications for the desertification of western South America. *Geology*, 30, 43-46.
- 大迫次郎 (1992) : レアメタル資源の現状と将来。西暦2000年の資源地質。資源地質特別号13, 108-118.
- Sillitoe, R.H. and McKee, E.H. (1996) : Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province. *Econ. Geol.*, 91, 164-178.
- Vila, T. (1986) : Geología de los depósitos salinos del norte de Chile. Antecedentes geoquímicos y pautas de prospección de litio. In Frutos, J., Oyarzún, R. and Pincheira, M. (eds.) *Geología y Recursos Minerales de Chile*, Univ. Concepción, Concepción, 799-819.
- Zimmerman, U., Niemeyer, H. and Meffre, S. (2010) : Revealing the continental margin of Gondwana: the Ordovician arc of the Cordón de Lila (northern Chile). *Intern. Jour. Earth Sci.* (in press).

KOJIMA Shoji (2010) : Salar de Atacama: the largest world-class Li deposit.

< 受付：2010年4月2日 >