

## ポーランドのヴェリチカ岩塩坑と愛地球博ポーランド館から 寄贈された岩塩標本

### Wieliczka salt mine in Poland and halite specimens donated from Polish pavilion of EXPO 2005

後藤 晶子 (GOTO Akiko)<sup>1)</sup>・久紗宮 萌仁華 (KUSIAK Monika A.)<sup>1), 2)</sup>・  
仙田 量子 (SENDA Ryoko)<sup>1), 3)</sup>・常盤 哲也 (TOKIWA Tetsuya)<sup>4)</sup>・  
柴田 賢 (SHIBATA Ken)<sup>5)</sup>・鈴木 和博 (SUZUKI Kazuhiro)<sup>1)</sup>

- 1) 名古屋大学年代測定総合研究センター  
Center for Chronological Research, Nagoya University
- 2) ポーランド科学アカデミー 地質科学研究所 クラクフ研究センター  
Institute of Geological Sciences Kraków Research Centre, Polish Academy of Sciences
- 3) 現在：海洋研究開発機構地球内部変動研究センター  
Present address: Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
- 4) 名古屋大学環境学研究科地球環境科学専攻  
Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
- 5) 元名古屋大学年代測定資料研究センター長  
Former director of the Dating and Material Research Center, Nagoya University

#### Abstract

The Polish pavilion of EXPO 2005 donated three rock salt blocks which had been used to model galleries of Wieliczka salt mine, to the Nagoya University Museum. Wieliczka salt mine has been operated since the 13 century. Mining for the period of eight centuries produced over 250 km galleries with works of art, altars and statues sculpted in salt. Wieliczka salt mine was placed by UNESCO on the first international list of the World Cultural and Natural Heritage in 1978. The mine is located about 13 km southeast of Kraków in southern Poland. The salt deposit is developed in Badenian (16.4-13 Ma) marine sediments which filled the Carpathian foredeep. The salt-bearing sequence, folded and displaced as the result of the Carpathian nappe movement, is divided into two units. The upper unit (boulder deposit) is composed of olistostrome with huge halite blocks chaotically distributed within a matrix of fine-grained halite and clay. In the lower unit, the salt rocks are stratified with intercalated claystone and siltstone. This stratified unit is subdivided from the top into four layers; Spiza Salt, Shaft Salt, Stratified Green Salt and Oldest Salt.

The donated white halite specimens dug out from Spiza Salt (Cuboid; 36 × 26 × 24 cm, 37 kg and 63 × 39 × 31 cm, 65.7 kg) are aggregate of translucent large halite crystals. The gray specimen (slab; 63 × 40 × 21cm, 43.5 kg) consists of medium-grained irregular halite with small amounts of anhydrite and clay. The gray specimen contains 36.7% Na, 59.2% Cl, 2.2% Ca, 0.1% Mg, 0.1% K, 0.8% S, 0.6% SiO<sub>2</sub> and 0.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### はじめに

愛地球博 (EXPO 2005) のポーランド館に展示されていたヴェリチカ産岩塩の標本 3 個が、同館館

長のJ. Dzikowicki氏から、名古屋大学博物館に寄贈された。ビェリチカ岩塩坑は5000年以上にわたって塩を供給してきたヨーロッパ屈指の岩塩鉱床として、また、岩塩彫像で飾られた礼拝堂を始めとする地下の間やサナトリウムでもよく知られている(ポドレッキ, 2004)。この岩塩坑は、1978年の第1回世界文化自然遺産会議において、世界遺産に認定された。

愛地球博のポーランド館は、ビェリチカ産の岩塩を使って模造した“地下の間”を主要な展示としていた。ポーランド館を訪問して岩塩標本の質の高さに着目した著者の一人(柴田)は、足立守名古屋大学博物館長と協議して、ビェリチカ岩塩の一部を名古屋大学博物館に譲り受けたい旨をポーランド館に伝えた。これに応じて、Dzikowicki館長から名古屋大学博物館に再結晶した白色岩塩標本(図1A:重量37.0 kgと図1B:重量65.7 kg)と灰色岩塩標本(図1C:重量43.5 kg)が寄贈された。図1Aの白色岩塩標本では、1辺が20 cmを超えるハライトの結晶が観察できる。また、灰色岩塩は海水の蒸発残渣から岩塩層が形成される過程を記録する貴重な標本である。

本稿は、世界遺産に登録されたビェリチカ岩塩坑の地質と岩塩標本の化学的特徴を解説する。

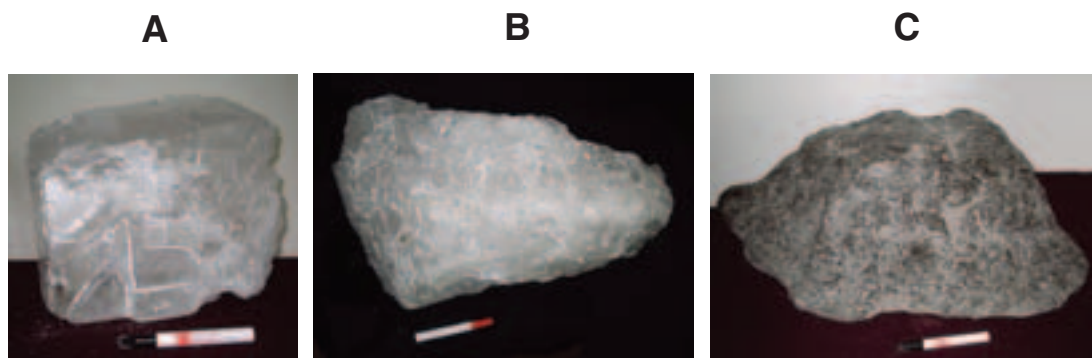


図1. 愛地球博のポーランド館から名古屋大学博物館に寄贈されたビェリチカ産の岩塩標本。

### ビェリチカ岩塩坑

ポーランド(首都:ワルシャワ)は東欧の国であり、北はバルト海に面し、南部はカルパティア山脈に達する。総面積は約31万km<sup>2</sup>で、日本の約6分の5の広さである。国土の大半はヨーロッパ平原にあり、海拔200 m以下の地域が全国土の75%に、300 m以下では91%に達する。北部の低地には氷河でつくられた大小9000余の湖が分布する。ポーランドの最高峰は、スロバキアとの国境にまたがるタトラ(Tatry)山地のリズイ(Rysy, 2499 m)である。

ビェリチカ岩塩坑は、ポーランド南部の都市クラクフから約13 km南東に離れたビェリチカ市街域に広がる(図2)。この地域の塩は約5000年前から利用されてきた。当初は自然に流れ出す塩水から、その後は井戸を掘って得た塩水から、製塩が行われた。塩水が枯渇するに従って、井戸が深くなり、その井戸掘りの過程で地下の岩塩層が発見されたと推定される。この岩塩を採掘するために、13世紀の半ば頃に、現在知られている最古のゴリシェフスキ立坑が掘削された。ビェリチカの岩塩採掘坑は歴代の王が所有し、委託または賃貸しの経営が行われた。ピヤスト王朝の14世紀およびヤギェウオ王朝の15~16世紀には、王の国庫収入の3分の1は岩塩鉱山からもたらされた(ポドレッキ, 2004)。この歴史ある岩塩採掘は1996年に中止された。それ以後は塩水からの製塩のみが実施されている。

ビェリチカ市街の地下には、地下64 mから327 mの間に何枚かの岩塩層が存在している。これを採掘するために掘った坑道の総延長は250 kmに及ぶ。約2500万トンの岩塩が採掘された結果、2000ヶ所以上の“地下の間”が形成され、その一部は湛水して“地下の湖”となっている(ポドレッキ, 2004)。

現在、観光用として地下64 mから135 mの深さにある“地下の間”や“湖”が公開されており、灰色の岩塩の壁に美しい彫刻が施されたホールなどが見学できる。また、地下211 mにある“地下の間”は、サナトリウムになっており、呼吸器系をはじめとする様々な疾病の治療に使われている。

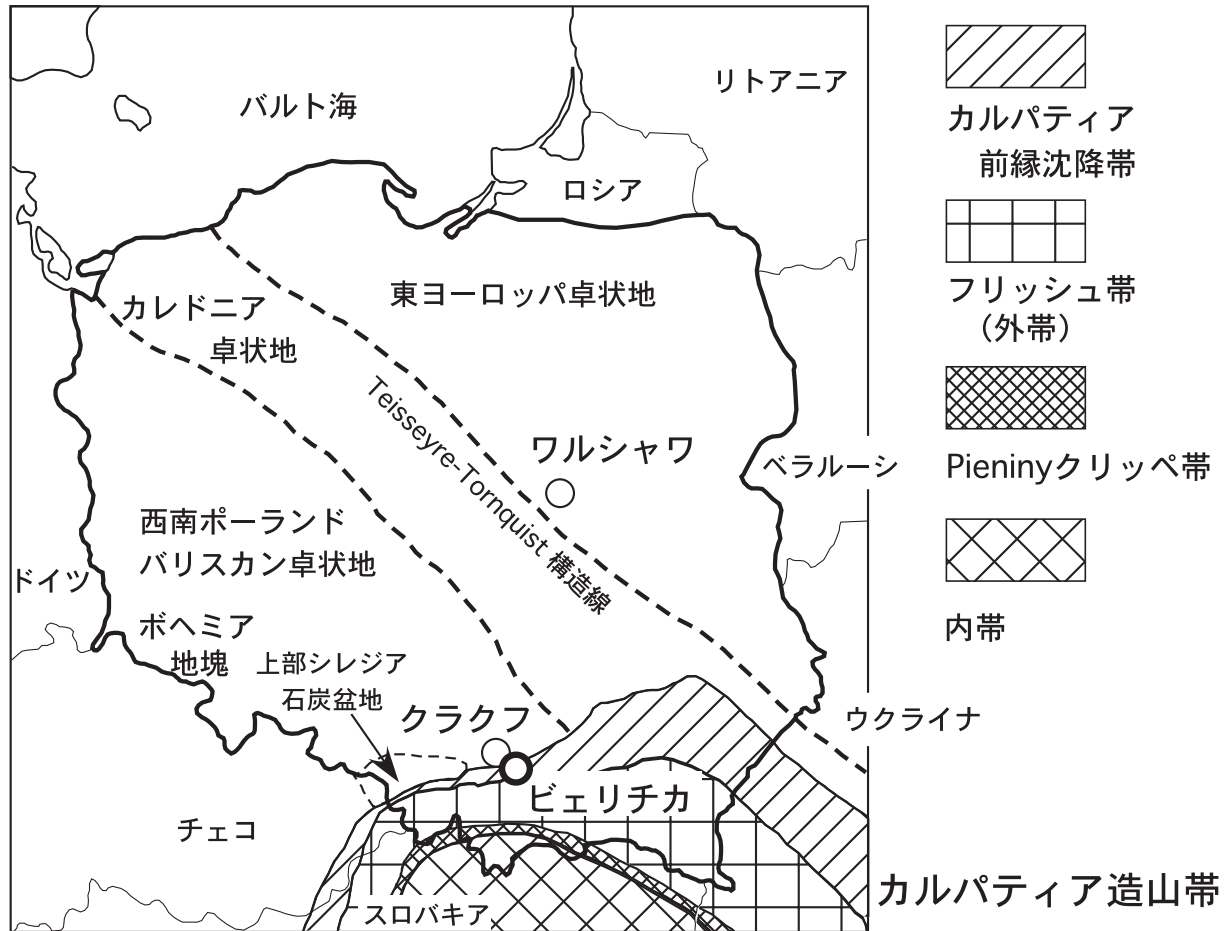


図2. ポーランドの地質構造区分図（鞠子，1998および平野，1998の地質構造区分を簡略化）。

### 地質概要

ポーランドの北東部には原生代末以降は広域変成作用や深成作用を受けなかった東ヨーロッパ卓状地（プラットフォーム）、中央部にはカレドニア変動を最後に安定化したカレドニア卓状地、南西部には石炭紀のバリスカン変動を最後に安定化した西南ポーランド・バリスカン卓状地とボヘミア地塊が広がり、それらの南東部にアルプス変動を直接的に受けたカルパティア（Carpathian）造山帯が衝上している（図2，鞠子，1998；平野，1998）。東ヨーロッパ卓状地とカレドニア卓状地の境界は、コペンハーゲンからワルシャワの南を通り黒海に至るNW - SE方向のTeisseyre-Tornquist構造線である。東ヨーロッパ卓状地は基盤岩とカンブリア紀以降の被覆層から構成される。カレドニア卓状地と南西ポーランド・バリスカン卓状地には二疊紀～新生代の被覆層が存在する。バリスカン造山の変成岩や花崗岩が露出するボヘミア地塊は国境をまたいでチェコおよびドイツ側にも広がる。この東方のバリスカン前縁海盆の地域には、石炭紀後期のNamurian期からStephanian期にかけて全層厚8500 mの挟炭層が堆積した上部シレジア石炭盆地（Upper Silesia Coal Basin）がある（Kotas, 1994）。

ポーランドのカルパティア造山帯はほぼ東西に伸び、南から北に向かって、内帯、Pieninyクリッペ

帯, フリッシュ帯 (外帯), モラッセが堆積したカルパティア前縁沈降帯の4構造単位に区分される。Pieninyクリッペ帯は, テーチス海が閉じた主縫合線と考えられ, 漸新世~前期中新世 (~16.5 Ma) に現在の場所に定置したと推定されている (Csontos *et al.*, 1992)。内帯はPieninyクリッペ帯に, Pieninyクリッペ帯はフリッシュ帯に, フリッシュ帯はカルパティア前縁沈降帯に, それぞれ衝上している。カルパティア前縁沈降帯では, 古生代やジュラ紀の地層を基盤にして, Badenian期 (16.4~13 Ma, 一般的区分のLanghian期とSerravalian期前半に相当) とSarmatian期 (13~8.5 Ma) 初頭の後造山期モラッセ堆積物が厚く発達する (Peryt, 2000; Cendón *et al.*, 2004)。これは礫岩や砂岩の卓越する下部層 (10~40 m), シルト岩や粘土岩卓越で上部に石膏や岩塩などの蒸発岩層を含む中部層 (1500 m), シルト岩や粘土岩あるいは珪質碎屑岩の上部層 (1500~2500 m) からなる (Oszczypko, 1996)。上部層は中部層を不整合に覆う。この層序は, カルパティア前縁沈降帯の部分が, デルタやタービダイトの発達する浅海環境から深海環境に変わった後, 干上がって蒸発岩を形成し, 浸食を経て再び深海環境になったことを示唆する。ポーランドのフリッシュ帯がモラッセ堆積物に衝上したのは一般的区分のTortonian期 (11.0~6.0 Ma) であるので, この地のカルパティア前縁沈降帯はSarmatian期後半に急速に縮退したと考えられる。

### ビェリチカの地質

ビェリチカの岩塩鉱床はBadenian期の中部層上部に胚胎され, 約300 mの層厚で幅1 km, 長さ6 kmにわたって広がる (Gawel, 1962)。岩塩鉱床は, 上位部分が角礫 (オリストストローム) から, 下位部分が粘土層やシルト層と互層する層状岩塩から構成され, 全体がカルパティア造山のナッペ運動で複雑に変形している (図3, Gawel, 1962)。オリストストローム (boulder deposits) の基質は微細粒岩塩

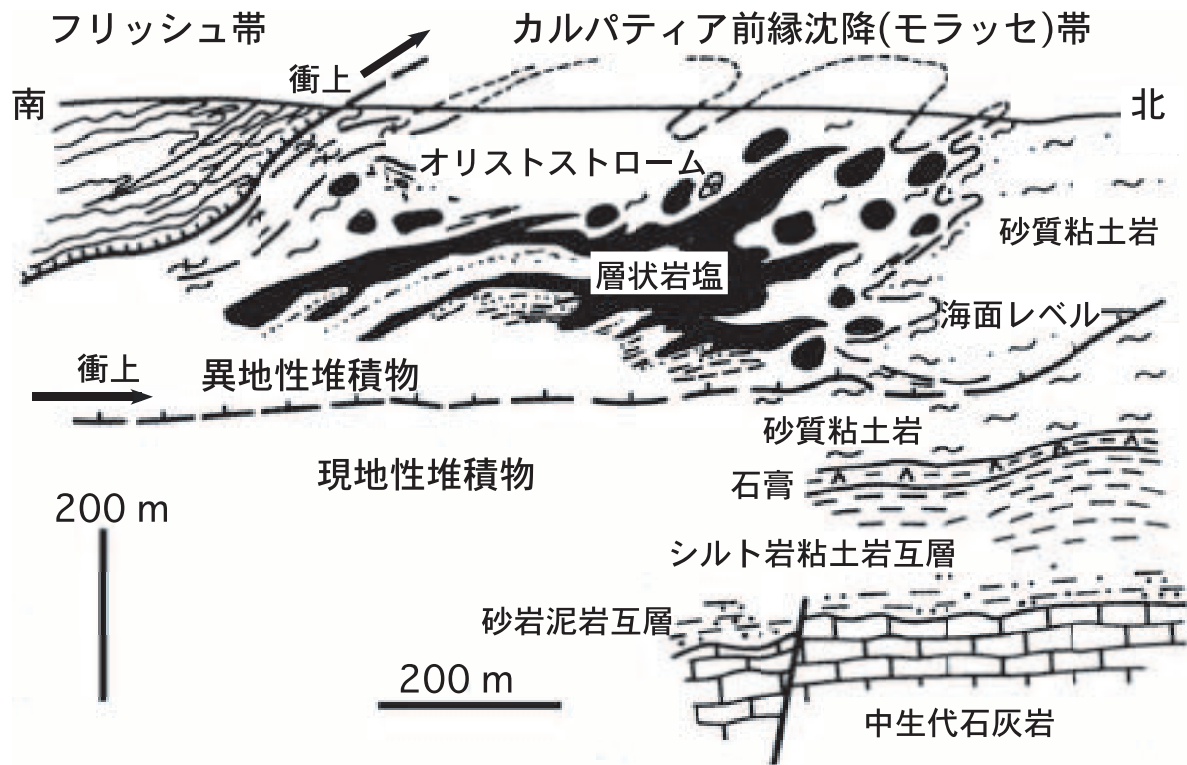


図3. ビェリチカ地域におけるカルパティア造山帯のフリッシュ帯と前縁沈降帯の南北断面図 (Gawel, 1962の図を簡略化)。



を含む粘土～シルトで構成される。岩塩ブロックは1 m<sup>3</sup>を越えるものが多くあり、最大サイズは10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>に達する。オリストストローム中の岩塩ブロックが濃集する部分は、ステンドグラス様岩塩、緑色岩塩、ズベール岩塩と呼ばれている（図4）。下位の層状岩塩層（stratiform deposits）は、碎屑岩や蒸発岩が繰り返し堆積する過程で、蒸発岩の塩分が部分的に溶解して移動・濃集し、再結晶することで形成されたと考えられる。層状岩塩層は、上位から下位に向かって、スピーザ岩塩、シャフト岩塩、層状緑色岩塩、古岩塩に区別されている（図4）。各岩塩層の特徴（Gaweł, 1962; Ślącza and Kolasa, 1997; Galamay *et al.*, 1997 and 2003; Bukowski *et al.*, 2000）は次の通りである。

ズベール岩塩（Zuber Salt）：粘土～シルトの基質中に大小様々な岩塩や石膏・硬石膏・碎屑岩の礫～ブロックを含む厚さ約150 mの地層で、幅4 km、長さ15 kmにわたって広がる。岩塩礫や岩塩ブロックの形態は角張ったものから円磨されたものまで多様である。採掘対象となった岩塩ブロックの大きさは数m<sup>3</sup>から12000 m<sup>3</sup>程度であるが、中には10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>という超巨大なものもある。

スピーザ岩塩（Spiza Salt）：最も広範囲に分布する層厚20～30 mの岩塩層で、碎屑岩層を挟んで、上部スピーザ層と下部スピーザ層に分けられる。上部スピーザ層の下位部分は、再結晶して、透明度の高いハライトの粗粒結晶から構成されている。スピーザ岩塩層中のNaClの含有率はおおよそ90%であるが、上部スピーザ層下位のような高純度岩塩層（“eagle”もしくは“royal salt”と呼ばれる）では99%に達する。観光用に公開されているなかで最深部に位置するマリア・テレサの部屋（Maria Teresa Gallery）は、主に上部スピーザ層を採掘した跡である。下部スピーザ層には、ハライト結晶から構成されるほぼ純粋な部分の他に、碎屑粒子が混在したり、石膏やマールを伴ったりしている部分が多い。

シャフト岩塩（Shaft Salt）：層厚が2 m程度の中粒ハライトから構成される高純度岩塩層である。一般に、瀝青の混合により、淡黄色を示す。この層と下位の緑色岩塩は、常に、層厚1.2～1.8 mの碎屑岩で隔てられている。

緑色岩塩（Green Salt）：硬石膏泥岩層を挟む4層（部分的に5層）の岩塩層から構成される。各岩塩層は細粒～数 cm のハライト結晶で構成されており、その層厚は0.5 m～3 mである。一般に粘土を含んでおり、NaClの含有量は約80%である。層間の泥岩層は一般に薄く、最大でも層厚1 mを超えない。不純物として混在する粘土により色づいて見える。緑色岩塩は、蒸発残渣からMgやKなどの成分が溶出しただけの、初性的なものであると考えられている（Garlicki, 1979）。

古岩塩（Old Salt）：粘土岩の薄層を挟む細～中粒岩塩の互層で、最上部分は粗粒になっている（Wiewiórka, 1988）。層厚は2～20 mと変化するが、平均は10 m前後である。古岩塩と緑色岩塩の間に岩塩下部砂岩（undersalt sandstone; Gaweł, 1962）と呼ばれる砂岩層が存在する。

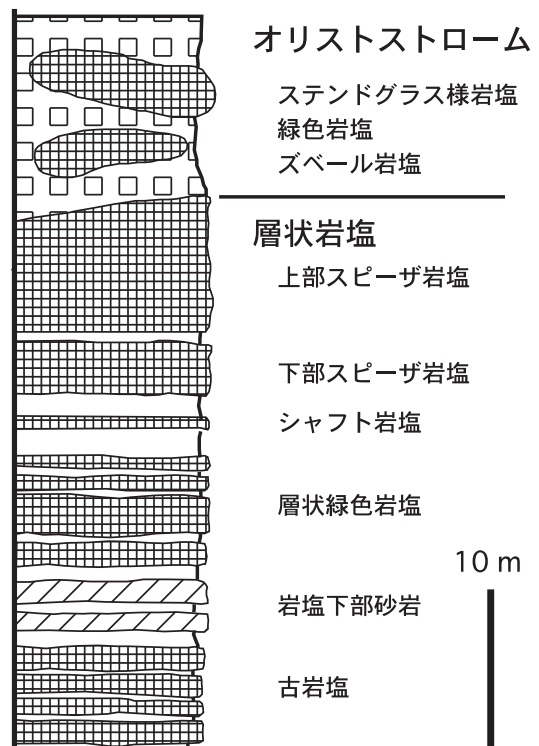


図4. ビェリチカ岩塩坑で観察される岩塩層の層序（Galamay *et al.*, 1997の柱状図を簡略化）。

### 寄贈ビェリチカ岩塩標本の外観と化学組成

寄贈されたビェリチカ岩塩のうち、図1Aの白色岩塩標本(約36 cm×26 cm×24 cmの直方体, 37.0 kg)は結晶度が非常によく、透明度の高い20 cmを超える巨大な結晶から構成される。ハライト結晶には直行する3方向の壁開が発達し、これに沿った滑らかな結晶面が観察できる。図1Bの白色岩塩標本(約63 cm×39 cm×31 cmの直方体, 65.7 kg)は、数cmのハライト結晶から構成される。これらの白色岩塩標本はマリアテレサの部屋から掘り出されたものである。図1Cの灰色岩塩(約63 cm×40 cm×21 cmの扁平体:43.5 kg)は様々な粒度(数cm程度)を示す濃灰～白色の結晶から成り、これらの粒間は極細粒のハライト結晶・硬石膏や泥によって充填されている。全体的にごつごつしており、一見した場合には非常に光沢のある灰色の岩石のようにみえる。

白色岩塩(図1A)と灰色岩塩(図1C)の全岩試料を、蛍光X線分析装置(Shimadzu XRF-1800)を用いて、ファンダメンタル・パラメーター法で化学分析した。また、比較試料として、日本の宮古島産の海水塩(市販品)を蛍光X線分析した。分析結果を表1に示す。白色岩塩の化学組成は、Na=39.2%、Cl=60.8%であり、他の成分は検出されない。この組成はNaClの理想組成であり、白色岩塩標本(図1A)がハライト結晶のみからなる高純度岩塩であることを示唆する。灰色岩塩の化学組成は、Na=36.7%、Cl=59.2%であり、SiO<sub>2</sub>=0.6%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.3%、Mg=0.1%、Ca=2.2%、K=0.1%、S=0.8%を含む。Si、Alは岩塩に混在する碎屑物(粘土)を構成しているのであろう。Mgも碎屑物として存在する可能性がある。CaとSは硬石膏(CaSO<sub>4</sub>)として存在していると推定される。

灰色岩塩は、海水塩に比べて、MgやKが少なく、Caが多い。海水の塩濃度には地域差があるが、主要な成分の相対的な割合は、ほぼ一定と見なすことができる。灰色岩塩は、粘土や硬石膏を含んでいても、海水が蒸発して残った残渣そのものではないことが明らかである。粘土を混合した海水の蒸発残渣からMgやKが溶解したものか、あるいは初生堆積物から溶出したNaClが2次的に沈殿したものと考えるのが妥当である。

表1. ビェリチカ産岩塩と日本近海の市販海水塩の蛍光X線分析結果(ndは検出できなかったことを示す)

元素(重量%)	白色岩塩図1A	灰色岩塩図1C	宮古島産市販海水塩
Na	39.2	36.7	35.7
K	nd	0.1	0.9
Cl	60.8	59.2	56.9
Ca	nd	2.2	0.4
Mg	nd	0.1	4.8
SiO <sub>2</sub>	nd	0.6	nd
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd	0.3	nd
F	nd	nd	0.3
S	nd	0.8	1.0
Total	100.0	100.0	100.0

### 謝 辞

本稿で解説した岩塩標本は、愛地球博ポーランド館の館長J. Dzikowicki氏と副館長の松本明氏のご好意により、名古屋大学博物館に寄贈されたものである。また本解説の作成において、K. Bukowski氏、A. Kędzior氏、J. Przybyło氏、A. Ślącza氏、P. Ulmaniec氏からビェリチカ岩塩坑の地質情報を提供して頂いた。記して感謝する。M.A. Kusiakは日本学術振興会の外国人特別研究員として名古屋大学年代測定総合研究センターで研究を行っている。

## 文 献

- Bukowski, K., Galamay, A. R. and Góralski, M. (2000) Inclusion brine chemistry of the Badenian salt from Wieliczka. *Journal of Geochemical Exploration*, 69-70, 87-90.
- Cendón, D. I., Peryt, T. M., Ayora, C., Pueyo, J. J. and Taberner, C. (2004) The importance of recycling processes in the Middle Miocene Badenian evaporite basin (Carpathian foredeep): palaeoenvironmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212, 141-158.
- Csontos, L., Nagymarosy, A., Horyvath, F. and Kovac, M. (1992) Tertiary evolution of the intra-Carpathian area: a model. *Tectonophysics*, 208, 221-241.
- Galamay, A. R., Bukowski, K. and Przybyło, J. (1997) Chemical composition and origin of brines in the Badenian evaporate basin of the Carpathian Foredeep: fluid inclusion data from Wieliczka (Poland). *Slovak Geol. Mag.* 3, 2, 165-171.
- Galamay, A.R., Bukowski, K. and Czapowski, G. (2003) Chemical composition of brine inclusions in halite from clayey salt (zuber) facies from the Upper Tertiary (Miocene) evaporite basin (Poland). *J. Geochem. Exp.*, 78-79, 509-511.
- Garlicki, A. (1979) Sedymentacja soli mioceńskich w Polsce. *Pr. Geol.*, 119, 1-66.
- Gaweł, A. (1962) Budowa geologiczna zona solnego Wieliczki. *Prace Inst. Geol.*, 30, 305-331.
- 平野英雄 (1998) ポーランドの金属鉱物資源. *地質ニュース*, 530, 31-41.
- Kotas, A. (1994) Coal deposits and coal resources. *Prace PIG*, 142, 8-26.
- 鞠子正 (1998) 東欧諸国の地質構造とメタロジェニー. *地質ニュース*, 530, 5-22.
- Oszczypko, N. (1996) Mioceńska dynamika polskiej części zapadliska przedkarpakiego. *Przeł. Geol.*, 44, 1007-1018.
- Peryt, T. M. (2000) Resedimentation of basin centre sulphate deposits: Middle Miocene Badenian of Carpathian Foredeep, southern Poland. *Sedimentary Geology*, 134, 331-342.
- ポドレッキ J. (2004) ビェリチカー地底岩塩採掘坑 (第3版), カルパティ出版社, クラクフ, pp.48 (ISBN-83-88553-47-X).
- Ślącza, A. and Kolasa, K. (1997) Resedimented salt in the Northern Carpathians Foredeep (Wieliczka, Poland). *Slovak Geol. Mag.* 3, 2, 135-155.
- Wiewiórka, J. (1988) Warunki geologiczne eksploatacji soli w Żupach Krakowskich. *Dzieje Żup Krakowskich*, 37-70. Wieliczka.

(2005年12月10日受付)