アルゼンチン、Neuquen州の重晶石—天青石鉱床*

早瀬 喜太郎¹

Amado L. BENGOCHEA²

1. 緒 言

アルゼンチン、Neuquen州には多数の重晶石—天青石鉱床が見出され、重晶石は主として石油さく井用重液の原料として採掘されている。筆者らはこれら鉱床中の主な9つの鉱床について調査研究を行なった。一方重晶石—天青石系の固溶体の合成実験も実施し、それによつて得た結果を上記諸鉱床の生成条件を考察する上の参考に供した。

調査した鉱床中の3つは母岩の層理を切る脈状鉱床であり、他の5つは母岩の層理にほぼ整合的な層状を呈する。残りの1つはこの両種の鉱体を含み、それらは不規則に連絡して、一方が他方を切っている証拠は認められない。層状を呈する鉱床の成因に関して、アルゼンチンの一部の地質学者は、浅海または塩湖が蒸発乾固する際の同生の (Syngenetic) 沈殿物であるという意見を持つているが、今までのところ、これらは熱水溶液が、石灰岩層を選択的に交代して、重晶石と天青石を晶出させたという説が有力であり、筆者等も種々の現象や、重晶石、天青石中の流体包有物の充填温度の測定結果等から後者を支持している。また海底火山活動によつて層状鉱層が形成されたという同生説も、母岩が主として陸成、沿岸成、浅海成等である上、火山噴出物の堆積が極めて僅かである点から否定されている。

BaSO_4 — SrSO_4 系固溶体のほぼ中間の組成を持つ鉱物 (モル比 $[\text{BaSO}_4]:[\text{SrSO}_4]$ が 3:1~1:5 の範囲) が、天然にほとんど産しないことについては多くの報告がある。Fohs¹⁾, Hintze²⁾, Palache et al.³⁾, Miropolsky⁴⁾, Starke⁵⁾, Jolly と Heyl⁶⁾, a), Nichol⁷⁾ 等の報告がそれである。Neuquen 州のこれらの鉱床中の重晶石で、 SrSO_4 成分が含まれている最高の値は 26.3% モルで、天青石中の BaSO_4 成分の最大値はほぼ 6% モルで、中間の組成をもつ鉱物は発見できなかった。この点に関しては筆者等の BaSO_4 — SrSO_4 系の固溶体の合成実験の結果によつて説明できよう。^{b)}

2. 鉱床賦存地域

アルゼンチンの首都、Buenos Aires から、西南に向かう鉄道は約 700 km で、Bahia Blanca 市を通る。鉄道はここで 2 つに分岐し、西南に走つて著名な湖沼観光地、San Carlos de Bariloche に至る線と、西に延びて Neuquen 州の州都、Neuquen 市を通つて約 750 km で Zapala 市に達する線とに分かれる。第 1 図に示すように、国道 40 号線は Zapala 市より北に向かい、190 km で Chos Malal 町に至る。国道 40 号線を Zapala 市の北 45 km で離れて、北西に間道を辿ると、15 km で Mallín Quemado 地区がある。ここには Achalay, Rio Agrio, La Porfía の 3 鉱山が西から東に並んで位置する。Achalay 鉱山には脈状と層状の両鉱床がある。Rio Agrio 鉱山の脈状鉱床は、途中溪谷によつて隠されているが、Achalay 鉱山の脈状鉱床の延長で、東方に約 1.5 km 離れている。La Porfía 鉱山の脈状鉱床は、Rio Agrio 鉱床の東に更に 2 km 離れているが、この 2 つの鉱床の関

第 1 図 鉱床分布図

* 1976 年 10 月 5 日受理

1. 正会員 工博 アルゼンチン、南部国立大学教授 自然科学教室

2. 地質学博士 アルゼンチン、南部国立大学助手 自然科学教室

a) Jolly と Heyl は彼等の調べた重晶石の SrSO_4 成分の最高値は 26.24 モル%であると報告している。

b) この合成実験を主とする報文 (英文) は現在岩石鉱物鉱床学会誌に投稿中である。

第1表 堆積岩層

紀	岩 層	統	堆 積 岩	堆 積 環 境
下部白亜紀	Huitrin 層	Hauterivian	砂岩, シルト岩, 頁岩	沿岸, 海陸漸移
	Agrio 層	Hauterivian-Barriasian	泥灰岩, 石灰岩	沿岸, 海陸漸移
	Hulichinco 層	Valanginian	砂岩, 石灰岩	沿岸, 浅海
	Quintuco 層	Valanginian-Barriasian	砂岩, 泥灰岩, 石灰岩	沿岸, 浅海
上部ジュラ紀	Vaca Muerta 層	Titonian	蛮岩, 砂岩, シルト岩	陸成, デルタ
	Tordillo 層	Kimmeridgian	蛮岩, 砂岩, 石灰岩	デルタ, 沿岸
	Auquileo 層	Upper-Oxfordian	石膏, ドロマイト質	海陸漸移
	La Manga 層	Oxfordian	石灰岩	浅海

第2表 母 岩

鉱床地区	堆積岩層	母 岩	堆積環境	鉱 山 名
Mallin Quemado	Vaca Muerta 層	砂岩, シルト岩	陸成, デルタ	Achalay Rio Agrio La Porfia
	Tordillo 層	頁岩, 石灰岩		
	Auquileo 層	石膏		
Bajada del Agrio	Huitrin 層 Agrio 層	砂岩, シルト岩 頁岩, 石灰岩	沿岸 海陸漸移	Santa Barbara Santa Ana
Churriaca	Huitrin 層 Agrio 層	シルト岩 石灰岩	沿岸 海陸漸移	Cecilia
Colli-Pilli	Agrio 層	砂岩, シルト岩 頁岩, 石灰岩 安山岩脈	沿岸 海陸漸移	Julio Cesar San Eduardo
Chos Malal	Tordillo 層 Auquileo 層	凝灰質砂岩 シルト岩, 頁岩 石灰岩, 安山岩脈	デルタ 沿岸 浅海	Arroyo Nuevo

係は審らかでない。Zapala市から北方66 kmで、国道40号線はBajada del Agrio村を通る。Santa Barbara, Santa Anaの2鉱山は、この村の北方2 kmにあり、この地区をBajada del Agrio地区と呼ぶ。Santa Barbara, Santa Ana鉱山の鉱床は層状鉱床で、母岩である下部白亜紀の堆積岩の背斜構造の一翼に賦存し、Santa Ana鉱床は、Santa Barbara鉱床の延長に当たっている。国道40号線はBajada del Agrioより北に延びて、60 kmでChurriaca部落を過ぎる。ここより東方15 kmにChurriaca地区があり、Cecilia鉱山の層状鉱床が見られる。Churriaca部落より北40 kmのNaunaucó部落より州道4号線に入ると、西南15 kmにBueyes山嶺がある。この山の東斜面にJulio Cesar鉱山の脈状鉱床、南西斜面にはSan Eduardo鉱山の層状鉱床が賦存する。この2つの鉱山の地区をColli-Pilli地区と称する。Chos Malal町から州道43号線は北に走ってAndacollo部落に至る。途中Chos Malal町より19 kmで43号線を離れて、南に11 kmほど鉱山道路を辿ると、Arroyo Nuevo 鉱山が位置する。この鉱山の鉱床は層状鉱床で、この地区をChos Malal地区と呼ぶ。これら鉱山の位置する標高は600～1300 mである。

3. 地 質 概 説

第1表に示すように、この地方の堆積岩は上部ジュラ紀から下部白亜紀の陸成、沿岸成、浅海成の蛮岩、砂岩、シルト岩、頁岩、泥灰岩、石灰岩、石膏等からなり、中深海

成、深海成のものは認められない。第2表は各鉱床地区の堆積岩層を示す。これらの堆積岩は一般に緩やかに褶曲しており、5°ないし20°の傾斜を示すが、Bajada del Agrio地区ではかなり著しい背斜構造をなす。白亜紀から第三紀にかけて、かなりの火山活動が認められ、安山岩の岩株や岩脈が存在する。特にColli-Pilli地区とChos Malal地区では鉱山地区内にも安山岩脈が見られる。

4. 鉱 床 概 説

第2表は調査した重晶石-天青石鉱床の母岩を示す。この表でわかるように、すべての鉱床の母岩は陸成、沿岸成、海陸漸移帯成、浅海成等で、中深海成、深海成の堆積岩は認められない。またすべての層状鉱床の母岩に石灰岩層が見出される。鉱床の厚さは1～4 mに達する。ある鉱床では重晶石と天青石のうち前者のみを産し、他の鉱床では両者が共生して見出される。しかし天青石のみを産する鉱床はない。この両鉱物を肉眼的に区別することは必ずしも容易でない。しかしこの地域の鉱床では両者の間に次のような傾向差があるので、慣れるとかなりの指針になり得る。

(1) 重晶石は一般に白濁を呈し、透明なもの

のが少ない。

(2) 重晶石は板状の晶癖を示し、結晶面が湾曲したり、緻密な放射状集合体をなして産する場合が多いが、天青石は柱状で結晶面が平滑で、独立した結晶をなすことが少なくない。

(3) 一般には天青石は淡青色を呈する。

第3表に示すように、重晶石、天青石共にそれぞれ多少のSrSO₄成分、BaSO₄成分を含んでいる。両者が緊密に共生する場合は、幅数mmから1～2 cmのリズミカルバンドをなして、石灰岩層を交代して見出されることは珍しくない。

硫化鉱物としては方鉛鉱が多く、重晶石鉱床中にかなりの大きさの単結晶^{c)}または結晶集合体として含まれて産することが多い。閃亜鉛鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱等も認められるが、それらは上下両盤中または、それと鉱体との境に近く見出される。これら硫化鉱物の多くは、重晶石によつて溶蝕されていることが稀でなく、前者が後者より早期に晶出した場合のあることを示唆する。上下両盤中に黄鉄鉱の微晶が無数に散在して、いわゆる黄鉄鉱化作用を被っていることも珍しい現象ではない。天青石を多量に伴っているSanta Barbara, Santa Ana, Cecilia 鉱床には硫化鉱物の産出が少ない。

ほとんどの鉱床に脈石として石英を伴っている。これらの石英は微細なモザイク状または羽毛状の玉随質で、重

c) 時に4 cmに達するものも見出される。

第3表 鉱 床

鉱 山 名	鉱床型	鉱 物	量 比	重晶石組成	天青石組成
			重晶石 : 天青石	SrSO ₄ 成分	BaSO ₄ 成分
Achalay	脈 状	重晶石, (天青石)	—	Mol. %	Mol. %
Rio Agrio	層 状	硫化鉱物, 石膏	—	4-26	0-3
La Porfia	脈 状	重晶石・硫化鉱物	—	4-20	—
Santa Barbara	層 状	重晶石, (天青石)	—	0-4	0-3
Santa Ana	層 状	重晶石, 天青石	4 : 1	3-4	0-3
Cecilia	層 状	重晶石, 天青石	1 : 1	1-3	0-3
Julio Cesar	脈 状	天青石, 重晶石	1 : 2	0-8	0-5
San Eduardo	層 状	重晶石, 硫化鉱物	—	1-4	—
Arroyo Nuevo	層 状	重晶石, 硫化鉱物	—	1-2	—
		重晶石, 硫化鉱物	—	0-3	—

(天青石) : 少量の天青石の産出を示す。

第4表 液体包有物の均一温度

鉱 床 名	鉱 物	平均値 t_0	標準偏差 σ	$t_0 \pm 2\sigma$
		°C	°C	°C
Achalay	天青石	138.8	7.11	124.6-153.0
"	"	133.5	9.02	115.5-151.5
"	重晶石	148.7	3.60	141.5-155.9
Santa Barbara	"	125.5	4.99	115.5-135.5
Cecilia	天青石	119.7	5.10	109.5-129.9
"	"	114.2	5.36	103.5-124.9
San Eduardo	重晶石	141.7	3.82	134.1-149.3
Arroyo Nuevo	"	156.6	4.22	148.2-165.0
"	"	155.6	6.26	143.1-168.1
"	"	156.2	6.24	143.7-168.7

$$t_0 = \frac{\sum t_i}{n}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (t_0 - t_i)^2}{n-1}}, \quad n : \text{観測数}$$

晶石と緊密に共生するか、微脈をなして重晶石を横切っていることが多い。逆に母岩の構成鉱物である石英屑片が、重晶石によつて溶蝕されている現象も認められる。

酸化作用による二次鉱物として、白鉛鉱、異極鉱、赤鉄鉱、褐鉄鉱、孔雀石、藍銅鉱も見出されている。

筆者等はこれら鉱床の重晶石と天青石中の液体包有物の均一温度 (Homogenization temperature, 充填温度 Filling temperature) の測定を行なつた。これら鉱床の重晶石、天青石には白濁しているものが多いので、測定は限られた透明な結晶についてのみ可能であつた。

重晶石中の液体包有物の均一温度の測定は、Roedder 等⁸⁾⁹⁾ や Rife¹⁰⁾によつて行なわれているが、前者の測定値は僅かであり、後者の測定値はバラツキが非常に大きい。^{d)}

筆者等の測定は1試料につき14~15の液体包有物に対しなされたが、その標準偏差は第4表のように、3.60~9.02°C程度で、バラツキが少ない。第4表によると次のような傾向が認められる。

- (1) 一般に天青石の方が重晶石より均一温度が低い。
- (2) 多量の天青石が重晶石と共生して見出される。

Santa BarbaraやCecilia鉱床の液体包有物の均一温度は、天青石が認められないSan Eduardo, Arroyo Nuevo鉱床のそれより遙かに低い値をとつている。

- (3) Achalay 鉱床には少量の天青石を産するが、この

d) 測定範囲は126°~297°にわたり、標準偏差は41.1°Cという大きな値をとつている。

鉱床の液体包有物の均一温度は上記2種鉱床のその中間の値を示す。

上下両盤の母岩は熱水溶液の作用を被つて、絹雲母化、珪化、緑泥石化、炭酸塩化、黄鉄鉱化しており、時には陶土化作用、モンモリロナイト化作用も認められる。

一般に天青石を多量に伴う

Santa Barbara, Santa Ana, Cecilia 鉱床では、熱水作用による母岩の変質が少ない傾向がある。

る。

層状を呈する鉱床の場合でも、重晶石や天青石の微脈が、両盤の母岩の層理を横切つて走る現象は珍しくない。また母岩である石灰岩層の石灰分に富む部分を選択的にこれら鉱物が交代して、薄層状をなす不純物を多く含む部分を縞状に残している証拠が明らかである。

重晶石そのものかなりのSrSO₄成分を含んでいるものがあり、その最大値はAchalay 鉱床から得られた重晶石で、26.3% モルに達する。これに反し、天青石は遙かに純粋で、BaSO₄成分の含まれる最高値は5% モルに過ぎない。既述のように、BaSO₄とSrSO₄のモル比 [BaSO₄] : [SrSO₄] が、3 : 1~1 : 5 の範囲の中間の組成を示す鉱物が、天然にほとんど産しないことは、よく知られている事実であるが、このNeuquen 州の鉱床についても上記のような現象が見られること、第3表に示すようである。

以上の現象から次の点が明らかである。

- (1) Neuquen 州の重晶石-天青石鉱床は次の3つに分類できる。

(第1型) 第3表に示すように多量の天青石を共生するが、重晶石そのものには余り多くのSrSO₄成分を含んでいない。Santa Barbara, Santa Ana, Cecilia 鉱床がこれに属する。

(第2型) 天青石は認められないし、重晶石そのものもSrSO₄成分に乏しい。これにはJulio Cesar, San Eduardo, Arroyo Nuevo の各鉱床が該当する。

(第3型) 少量の天青石を伴うのみであるが、重晶石そのものかなりの多量のSrSO₄成分を含むものが認められる。Rio Agrio, La Porfia, Achalay 鉱床がこれに当る。

第1型の鉱床では、上下両盤の母岩の変質は軽微で、硫化鉱物の共生も少ない。母岩である石灰岩層中に天青石と重晶石が未交代の不純な石灰岩薄層とリズミカルなバンドをなしており、これらの鉱床を形成した鉱液の温度の低かつたことを指示している。重晶石と天青石中の液体包有物の均一温度の測定結果も、他種の鉱床のそれに比して低い値をとつており、この推定を裏書きしている。

第2型の鉱床では上下両盤の母岩の変質が著しく、またかなり多量の硫化鉱物を伴っており、鉱液の温度の高かつたことを暗示している。このことはこれら鉱床から産した

重晶石中の液体包有物の均一温度が、他の型の鉱床のそれより高いことから推測できる。

第3型の鉱床の上下両盤の母岩の変質はかなり顕著であり、硫化鉱物の共生も目立つので、第2型の鉱床に似ているが、少量の天青石を産するとともに重晶石中の SrSO_4 成分が20%~26%モルに達するものがあるという特徴を有する。この型の鉱床から産する天青石と重晶石中の液体包有物の均一温度は、第1型と第2型のそのほぼ中間の値を示す。

(2) これら3つの型の鉱床は、鉱床が脈状であるとか層状であるという区別に関係なく、むしろ第2型の鉱床が、Neuquen 州鉱床地域の北西部に位置し、第3型の鉱床はその南部に、また第1型のそれは地域の中央部に賦存するという地域性に関係があるように思われる。このことはこれらの鉱床を形成した熱水溶液が、地域的に異なつた組成を持っていたことを暗示するものではなかろうか。

5. 鉱床各論

これらの鉱床中代表的な Cecilia 鉱床、Achalay 鉱床の2鉱床について記述する。

5・1 Cecilia 鉱山

この鉱山の鉱床の母岩は下部白亜紀の Huitrin, Agrio 層に属するシルト岩と夾在する石灰岩で、沿岸成、海陸漸移帯成と考えられている。この層は $\text{N } 20^\circ \sim 50^\circ \text{W}$ の背斜構造をなし、その北東翼が北西から東南に走る丘陵の北東斜面に露出している。背斜軸は上記丘陵の頂部に近く位置するため、丘陵頂部ではこの層はほとんど水平か僅かに西南に傾斜している。堆積岩層は上記北東斜面では $15 \sim 30^\circ \text{NE}$ に傾斜する。

シルト岩は $0.2 \sim 0.6 \text{ mm}$ の石英、アルカリ長石、堆積岩屑片、絹雲母等からなり、多少の炭酸塩鉱物によつて凝結されている場合が少なくない。石灰岩層は厚さ $2 \sim 3 \text{ m}$ でシルト岩中に夾在する。石灰岩層は鉱液の作用を受けて、再結晶した種々の大きさの方解石の集合体となつているため、その原構造は本鉱山付近では確かめられなかつたが、同じ Agrio 層と見られる Santa Barbara, Santa Ana 鉱床の母岩の石灰岩中には、Oölitic 構造を示すものが認められる。

石灰岩層は重晶石と天青石によつて交代されて本鉱山の鉱床をなしている。しばしば第2図に示すような重晶石と天青石、それに不純な石灰岩薄層が、リズムカルな縞状をなして見出される。一般に重晶石は白色、天青石は淡青色で、不純な石灰岩薄層は淡褐色を呈する。各鉱物の縞の厚さは数 mm から数 cm に達する。石灰岩層がほとんど完全にこれらの硫酸塩鉱物によつて交代されている場合でも、淡褐色の不規則な縞が、層理にほぼ整合的に存在することが稀でない。このような淡褐色の縞は不純な石灰岩薄層の痕跡を示すもので、Santa Barbara, Santa Ana の各鉱床ならびに、Achalay 鉱山の層状鉱体中でも認められている。このような淡褐色の縞の部分を検鏡すると、重晶石または天青石の集合体中に、無数の細微の褐鉄鉱または黄鉄

第2図 縞状構造を示す重晶石—天青石—石灰岩薄層 (Cecilia 鉱床)

鉱の粒子が点在する石英の残片が存在して、肉眼的に淡褐色の縞を作っていることがわかる。このような褐鉄鉱や黄鉄鉱の微粒子は、石英の残片中ではかなり均質に分布するが、同じ縞の中の重晶石や天青石の部分では、量的にも少なく、その分布も不規則で、あたかも重晶石や天青石が炭酸塩鉱物を交代した時、鉄鉱物の大部分を溶かされ、鉄分の残りが、これら硫酸塩鉱物の結晶が成長した時、横に押しのけられたように見える。

重晶石—天青石の鉱床は既述のように、石灰岩層を選択的に硫酸塩鉱物が交代して生じたもので、丘陵の頂部から谷底への北東斜面に露出しており、南東から北西にかけて約 1.5 km の間、断続して分布している。鉱床の見られない所は鉱床が浸食によつて失われているか、断層によつて切断された場所である。鉱床は狸掘り式に地表から不規則に採掘されているため、確かめられている範囲は地表から 10 m 以内の浅い所に限られているが、丘陵の頂部から谷底までの 300 m の幅と、延長方向にほぼ 800 m 程が採掘区域となつている。重晶石と天青石との量的割合はほぼ $1:2$ とみられる。

石灰岩残片と重晶石または天青石との境界近くを検鏡すると、境界に最も近い所では、これら硫酸塩鉱物の微細な針状結晶が、放射状に集つて $20 \sim 80 \mu$ の小さな球状をなして、再結晶したと思われる方解石結晶中に分布している。その球状体は次いで第3図に示すような微細な羽毛状結晶の集合体になり、境界から鉱体に向つて次第に結晶の大きさを増して行き、時にはこの羽毛状結晶は、第4図に見られるように、 $2 \sim 4 \text{ mm}$ に達する。鉱体中ではこれらの硫酸塩鉱物は一般に柱状または板状の結晶の集合体となつて

第3図 石灰岩との境界に近い羽毛状重晶石 (十字 Nicols) (Cecilia 鉱床)

←
第4図
羽毛状重晶石(十字
Nicols)
(Cecilia
鉱床)

第6図 小空洞を取巻いて発達した大型の羽毛状重晶石
(十字Nicols)(Cecilia 鉱床)

第5図 空洞を取巻く重晶石-天青石の綿状構造
(Cecilia 鉱床)

第7図 石灰岩塊を取り巻く重晶石-天青石
(Cecilia 鉱床)

いる。

微細なモザイク集合体をなす脈石英が、重晶石や天青石鉱体中に見られるが、その量は多くない。この鉱床には硫化鉱物の存在はほとんど認められないが、相当量の石膏が、重晶石、天青石それに方解石の間隙を充たしており、この鉱物が鉱液からの最終晶出物であることを示している。

鉱床に接する母岩の変質は軽微であるが、絹雲母化作用、珪化作用、炭酸塩化作用の存在は明らかである。

この鉱床の北西端に近く、母岩が著しい褶曲を示して、石灰岩層が折重なっている場所があり、そこに長さ10m、幅8m、高さ3~5m程の不規則なレンズ状の洞窟がある。この洞窟の周壁は重晶石と天青石のリズミカルな縞によつて覆われており、一部にこれら鉱物が径数cmから十数cmに及ぶ球顆状皮殻をなして発達している。これは重晶石と天青石が、その洞窟の壁面から空洞に向つて晶出して行なつたことを示している。同様な重晶石、天青石によつて縁取られた小規模のレンズ状空洞は鉱体の至る所に見出されており、第5図に示すようである。顕微鏡的にも小さな空洞の周壁が第6図のようにやや大型な羽毛状重晶石によつて縁取られていることは珍しくない。第7図は石灰岩の大きな屑片の周辺を取り巻いて、重晶石と天青石が晶出したことを示している。

以上の現象は、この鉱床は石灰岩層が Ba^{++} と Sr^{++} を含む鉱液の作用により、重晶石と天青石によつて選択的に交代されて形成されたことを明示しているものと思われる。

既述のように、この鉱床から見出される重晶石と天青石は、それぞれ SrSO_4 成分と BaSO_4 成分の含有が少なく、両鉱物がリズミカルな縞をなすほど緊密に共生するにもかかわらず、その最大値は第3表に示すように、重晶石中

に8%モルの SrSO_4 成分、天青石中に5%モルの BaSO_4 成分を含むに過ぎない。

この鉱床の天青石中の液体包有物の均一温度測定の結果は、その平均値が114.2℃と119.7℃となっており、均一温度の測定値中の最低温度を示している。

5・2 Achalay 鉱山

この鉱山の鉱床は脈状のものと層状のものがあり、両者は不規則に連絡している。この鉱床の母岩は上部ジュラ紀のVaca Muerta, Tordillo, Auquilco層に属する陸成またはデルタ成の砂岩、シルト岩、頁岩、石灰岩、石膏層からなり、鉱床地区ではNE~SWの走向を持ち、おおむね10°~25°SEに傾斜するが、鉱床近傍では、走向、傾斜ともかなり乱れている。砂岩は0.01~1.5mmの石英、アルカリ長石、斜長石の粒子と少量の安山岩屑片からなる。シルト岩、頁岩もほぼ同様な組成を持つが、粒子の大きさは小さい。これらの岩石は鉱床近傍で、著しい珪化作用、絹雲母化作用、炭酸塩化作用、黄鉄鉱化作用、緑泥石化作用、沸石化作用を被っており、一部にモンモリロナイト化作用も認められる。石灰岩層はこれら堆積岩中に夾在するが、鉱床地域内では完全に重晶石によつて交代されており、原岩を見出すことは困難である。石膏層は雪花石膏よりなり、鉱山の西南と西方に露出するが、鉱床近傍では、断層によつて切断放擲されて、極めて不規則な分布を示している。

脈状の鉱床は第8図に示すように、堆積岩の層理を切つて、N30~45°Eの走向と、垂直に近く僅かに北西に傾く傾斜を示す。脈幅は1~2mで延長方向に300m、垂直方

第8図 Achalay 鉱山鉱床図

第9図 鉱床を横切つて採取した重晶石と天青石の組成 (Achalay 鉱床)

向には 80 m ほどが確かめられている。この鉱脈は更に 400 m 程離れて南西方向にその延長が知られている。北東方向への延長は溪谷を隔てて、Rio Agrio 鉱山の鉱脈に見出される。その距離はほぼ 1.5 km である。この鉱脈には小規模の 2, 3 の平行脈の存在が認められるが審らかでない。

この鉱山の層状鉱床は第 8 図のように、N 30 ~ 50° W の走向を持ち、20 ~ 30° SE の傾斜で、母岩の層理とほぼ整合的に見出される。この鉱床は多くの小断層によつて切られ、また著しく破碎されており、その割目は石膏によつて充填されていることが多い。走向には 200 m、傾斜方向に 200 m 程確かめられた所もある。厚さは 1 ~ 4 m で、断層によつて 20 m × 20 m × 2 m ほどの、小鉱体に分割され

第10図 合成 BaSO₄-SrSO₄ 系鉱物の組成と平衡溶液の組成

第11図 合成結果から得た推定不安定領域

た産状を呈する。時には Cecilia 鉱床におけるように、母岩の層理にはほぼ整合的な淡褐色の縞が重晶石鉱体中に認められることがあり、それが不純な石灰岩薄層の残跡を示すものと考えられる。

脈状鉱床と層状鉱床は不規則に連絡しており、その地点では、鉱体がいずれの鉱床に属するかを確かめ得ない状態で、いずれか的一方が他方を切っている証拠は認め難い。この現象は、両鉱床が同じ鉱化作用によつて、同一時期に形成されたことを物語っているものと考えられる。

この鉱床には天青石が僅かに見出されるが、それは現在の最高レベルの坑道内 (+95 m レベル) に限られている。^{e)}

層状鉱床の重晶石も、脈状鉱床のそれも白濁した板状結晶の集合体で、時には相当量の方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、黄銅鉱等の硫化鉱物を包含している。微細なモザイク集合体をなす脈石英を伴うことがあるが、その量は脈状鉱床において著しく、石英と重晶石が、上下両盤に平行なリズムミカルな縞をなして見出されることが稀でない。上下両盤の母岩は、既述のように熱水変質を被っており、特に脈状鉱床の場合、珪化作用と黄鉄鉱化作用が著しい。

この鉱床の重晶石が SrSO₄ 成分に富んでいることは、第 3 表に示すようである。筆者等は鉱体の上盤から下盤に向け鉱体を横切つて重晶石の試料を採取し、それに含まれている SrSO₄ 成分を測定した。^{f)} 第 9 図はその測定結果である。この図にある標高は、Achalay No.1 鍾押坑道のレベルを 0 m とした試料採取個所の高さである。これらの図から次のことがわかる。

(1) 鉱床の中心付近の重晶石は、上下両盤に近い重晶石

e) Achalay No.1 鍾押坑道のレベルを 0 m とし計算した。

f) BaSO₄-SrSO₄ 系の格子常数は、筆者等の合成実験によつて組成と共に直線的に変化することがわかったので、格子常数値の測定によつて組成を決定した。

より SrSO_4 成分に富む傾向がある。

(2) 上記の傾向は、脈状鉱床の場合の方が層状鉱床の場合より著しい。

(3) 天青石の試料採取は、1カ所についてしか行なわれなかったが、 BaSO_4 成分の含有は少なく、脈を横切つての変化も少なかった。

(4) 一般に下部レベルの重晶石が、上部レベルの重晶石より SrSO_4 に富む傾向がある。

この鉱床の重晶石と天青石中の液体包有物の均一温度は第4表に示すようで、ほぼ中間の値をとっている。

層状鉱床が小さな断層によつて切断されたり、激しく破碎されたりしている現象については、鉱床の下方に存在していたと予想される石膏層が、鉱床を形成した鉱液の後続溶液によつて溶解されたため、層状鉱床が徐々に沈下した結果であると考えたと容易に理解される。

6. 鉱床の生成条件に対する考察

既述のように、Neuquen 州の重晶石-天青石鉱床には、それぞれの特徴を有する3つの型の鉱床があり、それが脈状鉱床と層状鉱床の区別に関係なく、むしろ地域的に異なつた組成の鉱液によつて形成されたことを暗示する。またこれらの鉱床から産出する重晶石と天青石には、両者の中間の組成を有するものがなく、モル比 $[\text{BaSO}_4]/[\text{SrSO}_4]$ が3:1から1:9の範囲の鉱物が欠けている現象が認められる。

筆者等は BaSO_4 - SrSO_4 系固溶体の合成実験を行ない、第10図に示すような、合成された鉱物の組成とそれと平衡にある溶液中の $[\text{Ba}^{++}]/[\text{Sr}^{++}]$ の関係を得た。^{g)} この図において、点線の部分は長時間の処理にかかわらず、単一鉱物を形成しない区域で、不安定領域または離溶領域というべき範囲である。このような離溶領域は、温度が低くなるにしたがつてその範囲が広がること第11図に示すようである。この実験の結果から次のことが明らかとなつた。

(i) 晶出してくる鉱物中のモル比 $[\text{BaSO}_4]/[\text{SrSO}_4]$ は、それと平衡な溶液中のイオン比 $[\text{Ba}^{++}]/[\text{Sr}^{++}]$ より、遙かに大きいので、鉱物の晶出に伴つて溶液中の $[\text{Ba}^{++}]/[\text{Sr}^{++}]$ は次第に小さくなる。(ii) 高い温度の溶液から晶出する鉱物は、低い温度の同じ組成を有する溶液から晶出する鉱物より SrSO_4 に富んでいる。(iii) しかし中間の組成を有する鉱物は、合成実験温度以下では安定でないで、 Sr^{++} に富む溶液からは、 SrSO_4 に乏しい重晶石と、 BaSO_4 に乏しい天青石が晶出することになる。

Neuquen 州の重晶石-天青石鉱床に見られる各種現象と、以上の合成実験の結果から、これら鉱床の成因について次のような推論を下すことができよう。

(1) 天然における天青石の産出が、重晶石のそれに比し遙かに稀であることは、もともとこれらの鉱床を形成した熱水溶液が、 Ba^{++} に比して Sr^{++} に乏しいものであつた

ことを推測させる。(2) このような鉱液からは、Julio César, San Eduardo, Arroyo Nuevoのような第2型の鉱床が形成されたと考えられる。したがつてこれら第2型の鉱床には天青石は見出されず、重晶石は SrSO_4 に乏しいものとなる。

一方温度が高いので、硫化鉱物の共生も見られ、上下両盤の母岩の変質も著しい。(3) BaSO_4 - SrSO_4 系鉱物の晶出に伴つて、鉱液中の $[\text{Sr}^{++}]/[\text{Ba}^{++}]$ は急速に高まつてくる。 Sr^{++} の量が Ba^{++} に比して十分高くなり、かつ温度がそれほど低くない鉱液からは、Achalay, Rio Agrio, La Porfíaのような第3型の鉱床が形成される。このような鉱床の重晶石は、一般に SrSO_4 成分に富む。鉱液が地表に近づくまでには、途中における重晶石の沈殿によつて、鉱液中の $[\text{Sr}^{++}]/[\text{Ba}^{++}]$ は更に高まつてくる。しかし離溶領域の組成を有する鉱物の晶出は不可能であるため、温度が下降した溶液からは、 SrSO_4 成分に乏しい重晶石と BaSO_4 成分に乏しい天青石が晶出してくることになる。Achalay 鉱床において、下部レベルで SrSO_4 に富む重晶石が、上部レベルで SrSO_4 に乏しい重晶石が見出され、最高レベルで少量の天青石が認められるのは、この仮説を裏づけるものと考えられる。したがつて第3型の鉱床を作つた鉱液が、その根源から鉱床地区に到着するまでに、相当量の重晶石を晶出したが、温度の降下はそれ程でなかつたことを意味するものであろう。このAchalay 鉱床において、上下両盤に近い重晶石が SrSO_4 成分に乏しく、中心付近のそれが SrSO_4 に富む現象は、重晶石が最初上下両盤から中心に向つて晶出して行くので、熱の母岩への拡散が、重晶石の帯によつて妨げられる結果、鉱床の中心付近の温度が、より高温に保たれたためと考えられる。同一組成の鉱液から晶出する重晶石中の SrSO_4 成分は、最初上下両盤近くを流れた低温の熱水溶液からのものより、あとから中心付近に限定されて流れた高温の鉱液から晶出されたものが、より多かつたと推測できる。

同様の現象は筆者等の1人によつて磁硫鉄鉱鉱床の磁性についてと、^{11)~14)} 螢石鉱床の螢石中の液体包有物の均一温度¹⁵⁾にも認められている。この第3型の鉱床では、上下両盤の母岩の変質も、硫化鉱物の共生も第2型の鉱床と同じく著しい。(4) 鉱液中の $[\text{Sr}^{++}]/[\text{Ba}^{++}]$ が十分に高く、かつ温度が割合低いときは、離溶領域の存在のため、 SrSO_4 に乏しい重晶石と、 BaSO_4 成分に乏しい天青石が晶出してくるものと思われる。これが第1型のSanta Barbara, Santa Ana, Cecilia 鉱床を作つた条件であろう。このような鉱床では温度が低いので、両盤の母岩の変質も少なく、硫化鉱物の共生も乏しい。

以上の推論は、これら鉱床の重晶石、天青石中の液体包有物の均一温度の測定結果によつて裏書きされる。(5) 母岩の変質中最も顕著なものが絹雲母化作用、珪化作用、炭酸塩化作用であることは、これらの鉱床を形成した熱水溶液が、中性または弱アルカリ性であつたことを示唆する。(6) 鉱床の型式が既述のように脈状、層状の区別に関係なく、むしろ地域的に異なつているのは、偶然の結果ともいい得

g) この実験では、適当に混合した BaCl_2 - SrCl_2 水溶液中に合成した純粋な SrSO_4 結晶を入れ、少量の NaCl を加えて、オートクレープで20~40日間処理した。したがつて水溶液は中性である。 SrSO_4 中の Sr の一部は Ba^{++} と置換した。

るが、第2型の鉱床の分布する地域には、火山活動を示す安山岩株や安山岩岩脈の存在が見られるに反し、他の型の鉱床の分布区域にはそれが見られない点から、この現象は、次のように説明することが可能であろう。火山活動が熱水溶液の熱源と考えられるので、本来の Sr^{++} に乏しい鉱液によつて、火山活動区域内に第2型の鉱床が形成された。鉱液は上方や周辺に流動して行く間に、重晶石の晶出が行われた結果、 Ba^{++} に比して Sr^{++} の量を増し、温度も低下し、火山活動の区域よりかなり隔つた所に、第1型や第3型の鉱床が形成された。しかしこの場合、第1型や第3型の鉱床を作つた鉱液が、第2型の鉱床を形成した鉱液と同じ熱源に由来する必要はなく、第1型や第3型の鉱床区域の下部に貫入した別の火山岩体であつて、それは浸蝕作用が進んでいないため、まだ地表に露出していないと考えることも可能である。そのような場合には、第1型や第3型の鉱床の下底または近傍に、第2型鉱床の存在の可能性もあると思われる。

参 考 文 献

- 1) Fohs, F. J. (1913): Barite deposits of Kentucky, Kentucky Geol. Survey, 4 series, pt. 1, 441~588
- 2) Hintze, C. (1929): Handbuch der Mineralogie, vol. 1, De Gruyter, Berlin & Leipzig, 3885~3889, 3951~3955
- 3) Palache, C., Berman, H. & Frondel, C. (1951): Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., vol. 2, John Wiley and Sons, New York
- 4) Miropolsky, L. M. (1961): Admixtures of barium and calcium in celestite, Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R., Intern. Ed., vol. 33, 64~65
- 5) Starke, R. (1964): Die Strontiumgehalte der Baryt, Freiburger Forschungsh., C 150
- 6) Jolly, J. L. & Heyl, A. V. (1964): Mineral paragenesis and zoning in the Central Kentucky mineral district, Econ. Geol., vol. 54, 596~624
- 7) Nichol, D. (1973): Pernatty Lagoon barite deposits, Mineral Resources Review S. Australia, vol. 135, 158~162
- 8) Roedder, E., Heyl, A. & Creel, J. (1968): Environment of ore deposition of Mex-Tex deposits, Hansonburg district, New Mexico, from studies of fluid inclusions, Econ. Geol., vol. 63, 336~348
- 9) Roedder, E. (1971): Fluid inclusion evidence on the environments of formation of mineral deposits of the Southern Appalachian valley, Econ. Geol., vol. 66, 777~791
- 10) Rife, D. L. (1971): Barite fluid inclusions, geothermometry, Cartersville Mining district, Northwest Georgia, Econ. Geol., vol. 66, 1164~1167
- 11) 早瀬・原田 (1952-a): 磁硫鉄鉱の特性 (No. 2), 日本鉱業会誌, 68巻 95~101
- 12) 早瀬・原田 (1952-b): 磁硫鉄鉱の特性 (No. 3), 日本鉱業会誌, 68巻, 513~517
- 13) 早瀬・原田・鞠子 (1956): 津田鉱山の磁硫鉄鉱の磁気特性とその基礎的浮遊選鉱試験, 早稲田大学鉱山学科研究報告, 5巻, 524~529
- 14) Hayase, K. & Mariko, T. (1961): On the thermal metamorphism of the ore body of the Yanahara mine, Jour. Geol. Society of Japan, vol. 67, 1~13
- 15) Hayase, K. & Manera, T. (1973): A statistical analysis of experimental data on filling temperature of fluid inclusion in fluorite from fluorite deposits of Patagonia, Argentina, Mining Geology, vol. 23, 1~12

Barite-celestite Deposits in Neuquen Province, Argentina

by Kitaro HAYASE and Amado L. BENGOCHEA

Many barite-celestite deposits are found in Neuquen province, Argentina. Nine barite-celestite deposits of this province were studied by the writers. Three of them are vein type, the other five are bedded type and the rest is a combination of these two types. The deposits of vein type are transversing the stratifications of sedimentary rocks such as sandstone, siltstone, shale and limestone of the Upper Jurassic or Lower Cretaceous period. The bedded type deposits are roughly concordant to the stratification of similar rocks of the vein type deposits. The bedded type deposits are considered to be formed by selective replacement of limestone seam by barite and celestite. The result of study on the homogenization temperature of liquid inclusion in barite and celestite of these deposits, the chemical composition of minerals of barite-celestite series, mineral occurrences, wall rock alterations, the result of study of synthesis of barite-celestite series etc. show that these mineral deposits can be classified into three types and some hypotheses on the conditions and the compositions of hydrothermal solutions which might form these deposits, are explained.