



## 地熱地帯にみられる鉱物

金原 啓 司 (地熱熱部)  
Keiji KIMBARA

### 1 はじめに

箱根や八幡平などの火山・温泉地帯(地熱地帯)に出かけると“地獄”とか“犀の河原”とか称する草木1本生えていない荒涼たる場所に出会うことがしばしばある。これは地下から湧出する高温の温泉(多くの場合は酸性を呈する)や  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  などのガスにより岩石が溶脱作用を受け珪化・粘土化したために生じた地熱変質帯でありここには様々の鉱物が生じている。また地熱地帯には温泉沈殿物に分類される一連の鉱物が存在するほか火山の火口のまわりには火山ガスの昇華によって生じた鉱物(昇華鉱物)が認められる。このように地熱地帯には多種多様な鉱物が知られておりその種類と性質および時空的分布より岩石の変質作用時の物理・化学的条件の推定が可能である。このため地熱地帯に見られる鉱物の調査は地熱を調べる上で大変重要な調査の1つとされている。以下地熱地帯に見られる鉱物の概要についてふれてみることにしよう。

### 2 地熱地帯に見られる鉱物

地熱地帯に見られる鉱物を化学組成に基づいて分類すれば珪酸塩鉱物、硫酸塩鉱物、炭酸塩鉱物、硼酸塩鉱物、硫化鉱物、酸化鉱物、水酸化鉱物、ハロゲン化鉱物、元素鉱物などに分類できる。次に産状別に地熱地帯に見られる鉱物をながめてみよう。

#### 2.1 温泉沈殿物

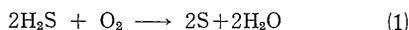
温泉が地表に湧出したとき主として温度低下に伴う物理化学的变化によって温泉水より沈殿したものが温泉沈殿物と呼ばれている。一國(1973)の分類に従えばこれには珪華、石灰華、硫黄華、硫化物、硫酸塩、鉄華がある。

珪華は無定形のオパール( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )であるが  $\text{Al}_2\text{O}_3$  など少量含まれる。日本の温泉には大規模な珪華は少ないが秋田県秋の宮温泉および長野県中房温

泉の珪華(いずれも天然記念物に指定されている)は大規模なものとして有名である。一般に珪華の沈殿は高温条件で石英に飽和した溶液の温度低下によって起こることになるがアルミニウムの共存は沈殿を促進させる効果がある(一國 1968)。地熱発電所では地熱熱水から沈殿した無定形のシリカスケールは熱水輸送管や還元井の目づまりを起こすため問題となっており現在これを除去するための研究が進められている。

石灰華は温泉沈殿物としては最も一般的なものであり鉱物学的には方解石( $\text{CaCO}_3$ )と霰石( $\text{CaCO}_3$ )がある。温泉水から方解石が沈殿するか霰石が沈殿するかについては詳細な解説がある(北野 1969)。一般に霰石は高温・高圧で安定であり低温で不安定となる霰石は長い時間を経過すると方解石に変化する。また同一水溶液からは攪拌などによって急速に沈殿すると霰石に徐々に沈殿すると方解石になると言われている。大規模な石灰華としては北海道二股温泉、岩手県夏油温泉、栃木県奥鬼怒温泉、長野県白骨温泉が有名でありその多くは天然記念物に指定されている。

硫黄華は  $\text{H}_2\text{S}$  の酸化により遊離した硫黄によって次のように生ずる。



またイオウバクテリアにより生成した硫黄が沈殿することによっても生成する。硫黄華は秋田県玉川温泉、群馬県草津温泉に典型的な例を見ることができよう。

硫化物のうち硫化鉄として黄鉄鉱と白鉄鉱( $\text{FeS}_2$ で両者は同質二形)がある。また硫化砒素として鶏冠石( $\text{AsS}$ )、石黄( $\text{As}_2\text{S}_3$ )および無定形の  $\text{AsS}_2$  があり沈殿物として秋田県玉川温泉などから報告されている(一國 1973)。

温泉水中の硫酸は火山ガス中の  $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{SO}_2$  が水に溶解して出来るものと説明されている。硫酸を含む沈殿物としては石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )と硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )および明ばん石が最も一般的である。硬石膏は高温になるに従い溶解度が減少するので蒸発がなければ温泉水の冷却によっては沈殿しないことになる。地熱井のコア試料には脈を充填して硬石膏がしばしば認められてい

る。

明ばん石と鉄明ばん石が温泉水から直接沈殿したという証拠はない(一國 1973)とされているがその生成温度や産状からみて温泉水沈殿物として生ずる可能性はあるかもしれない。いわゆる明ばん石には  $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  (アルーナイト) と  $\text{NaAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  (ナトロアルーナイト)があり K と Na は固体体の関係にある。熱力学的計算によれば温度が高いほど K に富み(Zotov 1971) 雲仙温泉における天然の産状はこの計算結果を支持している(吉村ほか 1968)。一方鉄明ばん石にも  $\text{KF}_6^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  と(ジャロサイト)と  $\text{NaFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  (ナトロジャロサイト)があり K と Na は交換されることができる。合成実験結果によれば鉄明ばん石は明ばん石よりも低温で生じ(Höller 1967) 特に鉄明ばん石はその産状からみて常温近くでも生成するであろう。群馬県草津温泉近くの群馬鉄山(沈殿性褐鉄鉱々床)に産する鉄明ばん石は有名である。

重晶石( $\text{BaSO}_4$ )の一種で放射性元素に富む北投石( $\text{Ba}$ ,  $\text{Pb}$ )  $\text{SO}_4$   $\text{Pb}:\text{Ba}=1:4$ )も重要な沈殿物であり、秋田県玉川温泉より産している(南 1954)。また川原毛硫黄鉱山からは鉛重晶石が報告されている(椎川・山口 1956)。鹿児島県薩摩硫黄島の東温泉からタマルジャイト( $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )が(サンシャイン 1976) また箱根大涌谷からゾモルノカイト( $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (平野ほか 1965) がそれぞれ温泉沈殿物として報告されている。

前出の薩摩硫黄島の稲村岳周辺の温泉より湧出した弱酸性炭酸鉄泉は海水と反応して水和酸化鉄である赤色の鉄質沈殿物(鉄華)を生じている(鎌田 1964)。第四紀火山の周辺に見られる沈殿性褐鉄鉱々床では植物片をそのままおきかえた見事な鉄質沈殿物(大半は結晶化した針鉄鉱  $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$  よりなる)を見ることができ

る。鉄華ではないが薩摩硫黄島では温泉水と海水との反応により無定形の含水珪酸アルミニウムの沈殿物が生じており(鎌田 1964) また浅間火山地獄谷からは珪酸アルミナ質沈殿物(沈殿アロフェンと呼ばれている)が報告されている(小坂 1960 1961)。

## 2.2 昇華物

火山ガスなどの気体が噴気孔などから地表に噴出し冷却されると気体中の成分が昇華して様々な昇華鉱物ができる。例えば薩摩硫黄島火山の高温の火口からは硫黄(S) 磁鉄鉱( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 赤鉄鉱( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 輝水鉛鉱( $\text{MoS}$ ) モリブデンブルー( $\text{Mo(V)}$ と $\text{Mo(VI)}$ )の混合水和酸化物 無定形シリカ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )  $\alpha$ -クリスト

バル石( $\text{SiO}_2$ ) リンケイ石( $\text{SiO}_2$ ) 硼酸石( $\text{B}(\text{OH})_3$ ) 石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 石黄( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) アルノーゲン( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )などが報告されている(鎌田 1964; 吉田ほか 1972)。このほかに同火山からはコランダム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) レッデル石( $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_8 \text{Si}_{12}\text{O}_{30}$ ) (金原ほか 1977) および金雲母( $\text{KMg}_3 \text{Si}_3\text{Al} \text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ ) (鎌田 1964) が報告されている。1970~1971年の秋田駒ヶ岳の噴火では螢石( $\text{CaF}_2$ )が日本では初産出の昇華鉱物として報告されている(小坂ほか 1972)。以上の鉱物はその組成から見て火山ガスからの純粋な昇華物と火山ガスと周辺の岩石との反応によって生じたものの両方を含んでいると言えよう。

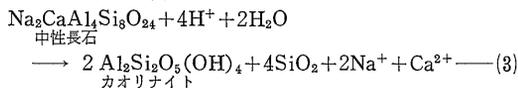
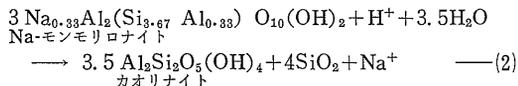
最近阿蘇湯の谷の蒸気井から硼酸石の産出が報告されている(古賀・野田 1980)。なお世界で最初の商業用地熱発電所であるイタリアのラルデレロでは古くから硼酸石の産地としても有名であった。宮城県鬼首地熱発電所の蒸気井では岩塩( $\text{NaCl}$ )がまた秋田県大湯温泉では給湯パイプ付着物として芒硝石( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )が生成している。

## 2.3 白色変質帯に見られる鉱物

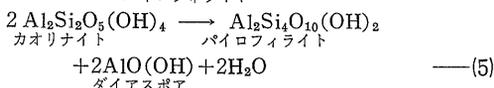
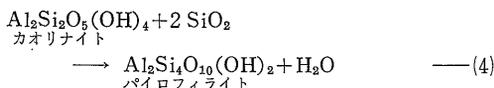
地熱地帯では白色変質帯はもっとも目につきやすい存在であり地熱資源をさがす上での大きな目安の1つになっている。大まかに言えば地表近くで生成した酸性の熱水により周囲の岩石が変質作用を受け鉄 アルカリ元素 アルカリ土類元素等が溶脱された結果シリカ アルミニウムに富む変質鉱物からなる変質帯(白色変質帯)が生ずる。高温でpHの低い熱水は周囲の岩石と反応しつつ上方もしくは側方に移動していくので結果として温度の低下とpHの上昇が並行して起こることになる。このようなわけで白色変質帯では熱水の通路(断層 フラクチャーなど)を中心にして次のような変質鉱物の累帯配列の一部およびすべてが認められることになる。

ダイアスポア( $\text{AlO}(\text{OH})$ )  $\rightarrow$  パイロフィライト( $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ )  $\rightarrow$  デイックイト( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )  $\rightarrow$  カオリナイト( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )  $\rightarrow$  ハロイサイト( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

ハロイサイトは層間に水分子を1層持つカオリン鉱物であり脱水するとメタハロイサイトになり再び復水することはない。カオリナイトは長石などの造岩鉱物もしくはすでに変質鉱物として生じているモンモリロナイトなどから生成する。この反応は次のように示されるであろう(Hemley and Jones 1964)。

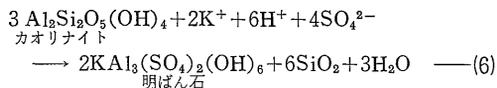


カオリナイト(三斜晶系)とデイッカイト(単斜晶系)はポリタイプの関係にあり産状から見る限りデイッカイトが高温の変質帯に出現する。カオリナイト(又はデイッカイト)は変質度が増すと次式のようにパイロフィライトもしくはダイアスポアに変化する(Hemley ほか 1980)。



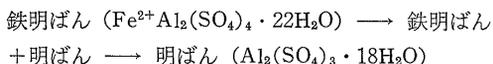
Hemley ほか (1980) の実験によれば 圧力依存があるものの (4) 式は およそ260℃以下 また (5) 式は290℃以下で反応が起こることになる。現在までのところ火山昇華物を除いて 地熱変質帯からさらに高温で生成するコランダム (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) および紅柱石 (Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>) の産出報告はほとんどないので ダイアスポアを伴う変質帯が最も高温の変質帯ということになる。

明ばん石(KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>)はカオリナイトからパイロフィライトにいたる広い温度範囲に認められる。明ばん石の多くは SO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S などの水への溶解によって生じた硫酸が次式のように粘土鉱物などの珪酸塩鉱物と反応することにより生ずるのであろう (Hemley ほか 1969)



パイロフィライトを伴うような高温の変質帯では しばしば Cl を含むズニ石(Al<sub>18</sub>Si<sub>5</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>18</sub>Cl)が生じておりこれは過熱蒸気下における変質産物であろうと推定されている(角 1972)。

別府温泉明礬地区では 噴気孔の上に青灰色原土を敷き“湯花”を生産しているが 変質が進むにつれて 次のような変化を示している(小坂 1968)



白色変質帯の中心部には 珪化帯がしばしば発達している。この珪化帯を構成するシリカ鉱物(SiO<sub>2</sub>)は時代が新しいと オパールもしくはα-クリストバル石であり 時代が古くなると石英となる。また野外調査の

結果によれば α-クリストバル石は100℃以内で石英に転移している。このほか 白色変質帯には シリカ鉱物としてリンケイ石とβ-クリストバル石が認められている。

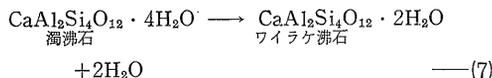
## 2.4 緑色変質帯に見られる鉱物

中性～アルカリ性熱水によって岩石が変質作用を受けると 一般に緑色を帯びた変質帯ができる。この緑色変質帯を特徴づける鉱物は カリウム マグネシウム 鉄などを含む粘土鉱物類と Ca-沸石である。変質程度の増加に伴って モンモリロナイト (Na<sub>0.33</sub>Al<sub>2</sub>(Si<sub>3.67</sub>Al<sub>0.33</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O) は鉄 マグネシウムを含む緑泥石 (Mg<sub>6-x-y</sub>F<sub>xy</sub>Al<sub>x</sub>)(Si<sub>4-x</sub>Al<sub>x</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>) に変化する。

天然の産状によれば 緑泥石は100℃程度で生ずるようである。なお両者の中間段階には緑泥石/モンモリロナイト混合層鉱物が出現する。

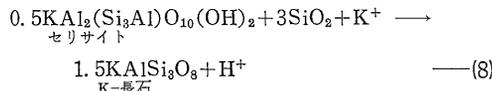
一方 カリウムイオンの存在下では モンモリロナイトはセリサイト/モンモリロナイトの混合層鉱物をへてセリサイト (KAl<sub>2</sub>(SiAl)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) に変化する系列も存在する。天然の産状から判断すると およそ100℃で混合層鉱物に また200℃でセリサイトに変化するようである。緑色変質帯では これらの粘土鉱物は色々な情報を提供してくれるので 重要である。なお最近メキシコのセロプリエト地熱地帯から 325℃以上の高温で黒雲母 (K(Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al)<sub>3</sub>(SiAl)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) の産出が報告されている (Eldersほか, 1979)。

緑色変質帯で最も普通に認められる沸石としてはモルデン沸石 ((Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Ca) Al<sub>4</sub>Si<sub>20</sub>O<sub>48</sub> · 14H<sub>2</sub>O) 濁沸石 (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub> · 4H<sub>2</sub>O) ワイラケ沸石 (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub> · 2H<sub>2</sub>O) がある。ほかに東沸石 ((CaNa<sub>2</sub>K<sub>2</sub>)Al<sub>2</sub>Si<sub>7</sub>O<sub>18</sub> · 7H<sub>2</sub>O) 輝沸石 ((CaNa<sub>2</sub>)Al<sub>2</sub>Si<sub>7</sub>O<sub>18</sub> · 6H<sub>2</sub>O) 湯河原沸石 (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub> · 4H<sub>2</sub>O) もしばしば脈鉱物として認められる。濁沸石とワイラケ沸石の間には



の関係があり この反応は おおむね 200℃ で起こる (Liou 1971)。200℃以上になると緑れん石 (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sup>3+</sup>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(OH)) が認められるようになるであろう。

地熱地帯からは K-長石 (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) の産出が報告されている。これは例えば

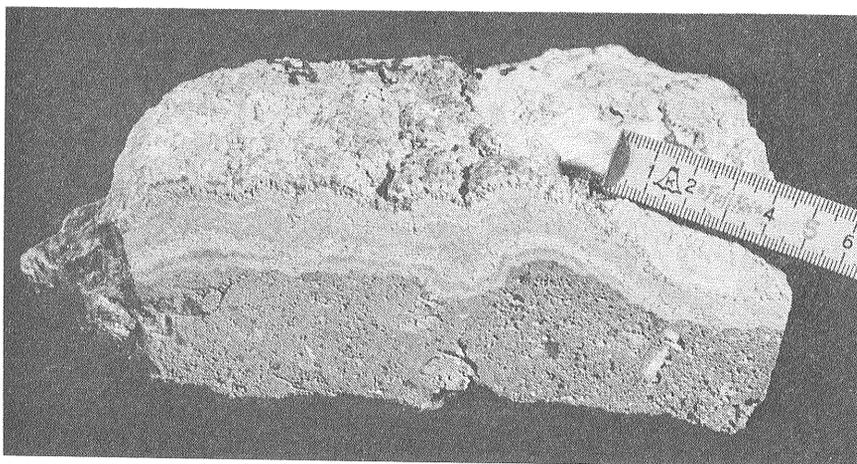


で示されるようにして生成する (Hemley and Jones 19

64). Kの位置にアンモニアが入った長石 パディングトナイト ( $\text{NH}_4\text{AlSi}_3\text{O}_8 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) も地熱変質鉱物として報告されている (金原ほか 1979).

### 文 献

- Elders. W.A., Hoagland, J. R. and McDowell, S. D. (1979) Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto Geothermics, Vol. 8, 201—209
- Hemley J. J. and Jones W. R. (1964) Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism Econ. Geol. Vol. 59, 538—569
- , Hostetler P. B., Gude A. J. and Mountjoy W. T. (1969) Some stability relations of alunite Econ. Geol. Vol. 64, 599—612
- , Montoya J. W., Marinenko J. W. and Luce R. W. (1980) Equilibria in the system  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  and some general implications for alteration/mineralization processes Econ. Geol. Vol. 75, 219—228
- 平野富雄・大木靖衛・田嶋鏗子 (1965) 箱根大涌谷の温泉沈積物 温泉工学会誌 Vol. 3, 131—138
- Höller H. (1967) Experimentelle Bildung von Alunit-Jarosit durch die Einwirkung von Schwefelsäure auf Mineralien und Gestein Contr. Mineral. and Petrol. Vol. 15, 309—329
- 一国雅巳 (1968) 温泉水から生成したケイ酸質沈積物の化学 温泉工学会誌 Vol. 5, 48—53
- (1973) 温泉沈積物 温泉科学 Vol. 24, 49—54
- 鎌田政明 (1964) 鹿児島県硫黄島の火山と地熱 地熱 No. 3, 1—23
- 金原啓司・茂野 博・大久保太治 (1977) 薩摩硫黄島の地熱変質 地質ニュース No. 272, 9—17
- ・大久保太治・角 清愛・千葉義明・斉藤清次 (1979) 玉川溶結凝灰岩類の変質 (その1) —岩手県葛根田川および北の又川地域 岩鉱会誌 Vol. 74, 433—442
- 北野 康 (1969) 温泉沈積物の成因 地熱 No. 21, 16—29
- 古賀昭人・野田徹郎 (1980) 阿蘇湯の谷蒸気井からのサソライトの噴出 日本地球化学会年会要旨 301—302
- Liou J. G. (1971) P-T stabilities of laumontite, wairakite, lawsoite, and related minerals in the system  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  Jour. Petrol. Vol. 12, 379—411
- 南 英一 (1954) 玉川温泉産の北投石について 鉱物雑 Vol. 2, 1—23
- 小坂丈子 (1960) 浅間山産含水ケイ酸アルミナ鉱物について 粘土科学の進歩 (2) 339—349 (技報堂)
- (1961) 沈殿アロフェンの生成機構について 粘土科学の進歩(3) 225—223 (技報堂)
- (1968) 火山温泉地域における岩石の変質現象について 地熱 No. 17, 65—79
- ・小沢竹二郎・平林順一・大平洋子 (1972) 秋田駒ヶ岳の 1970—1971 年の噴火について 地熱 No. 33, 21—37
- 椎川 誠・山口良二 (1956) 秋田県川原毛産鉛重晶石について 岩鉱会誌 Vol. 40, 137—148
- 角 清愛 (1972) 熱史の化石としてみた地熱地帯の熱水変質 地熱 No. 34, 24—39
- サンシャイン計画推進本部 (1976) 火山発電方式に関するフィジビリティスタディ 昭和50年度成果報告書 78—95
- 吉田 稔・小沢竹二郎・小坂丈子 (1972) 薩摩硫黄島に火山昇華物として生じるモリブデン鉱物—モリブデンブル—およびモリブデナイト 日化誌 No. 3, 575—583
- 吉村豊文・林 正雄・関 秀哉 (1968) 雲仙温泉産 alunite 九大理島原火山温泉研報 No. 4, 1—8
- Zotov A. V. (1971) Dependence of the composition of alunite on the temperature of its formation Geochm. Intern. Vol. 8, 71—75



玉川温泉産北投石  
北投石は岩石の表面上に層状に沈殿しており 玉川温泉ではその成層速度は8～10年/mmと推定されている。ちなみにここでは1,000年～2,000年前より北投石の沈殿が始まったらしいことが報告されている。