

酢川変質帯における透明石膏の産状と成因

山形大学理学部地球環境学科 中 島 和 夫
旧姓、柏倉、札幌市在住 鶴 見 江里子

1. はじめに

蔵王温泉北西の滝山から南東の熊野岳にかけての広い地域には、主に珪化や粘土化を呈する幾つかの変質帯が分布している(地質調査所, 1989)。そのうち蔵王温泉街と西方の酢川沿いにわたって分布する、酢川変質帯において長澤・大場(1989)は県内の第四紀の温泉変質帯では初めて透明石膏(以下、石膏とする)の良好な結晶が産出することを報告した。報告書には石膏の産状と特徴について詳しい記載がなされており、成因についても考察されている。それによると、上流域からもたらされた硫酸酸性水や変質物質を溶脱して酸性化した天水が岩石の亀裂などに沿って進入し、母岩を粘土化するとともに石膏を晶出したと考えられている。さらに、石膏は粘土化の進んでいるところほど多産する傾向があるため、成因は粘土化変質と密接に関係があるとされている。しかし、粘土化の進んだ部分に必ず石膏が産出するとは限らず、全く産しない場合もあり、粘土化作用と石膏の形成を定量的に評価する必要がある。

今回は、石膏の粘土化変質の度合いによる産状の違い、および成因について明らかにすることを目的とした。まず調査地域において石膏の産状と母岩の変質状況を詳しく調査し、細かくサンプリングし、試料は接着剤で固めて薄片製作可能なものについては薄片を作り、顕微鏡観察、EPMA分析、X線回折分析を行った。変質によってどんな鉱物が二次的に生成されたか、こうした調査や実験結果から、酢川変質帯における石膏の粘土化変質との関係、そして生成過程や生成条件を考える。

2. 調査地域の地質概要

温泉街から酢川周辺地域には、酢川泥流(市村, 1957)の堆積物が広く分布している(図1)。この泥流は、蔵王温泉北西の滝山から南西の鳥兜山にかけて、約5万年前(阿子島・山野井, 1985)におこった火山性の大規模な滑落によるもので、堆積物の特徴から岩屑流であったとされている(今田ほか, 1987)。含まれる礫種は滝山・鳥兜山起源の玄武岩類、安山岩類が多い。蔵王温泉を囲む、西側に開いた大きな滑落崖の近くでは溶岩の岩塊が多く、地滑り状の変形地形である直線状の窪地、離れ山(巨大な溶岩塊のこと)、弧状の急斜面、段地などが見られる(阿子島, 1985)。また、崩壊物は流れ山や泥流となって西方山麓まで分布している。酢川が侵食したところはさらに急斜面の地形が発達し、土砂が崩壊して崖になっている部分もあり、河川には砂防堰堤が多く作られている。蔵王温泉周辺では、これら泥流堆積物が第四紀の溶岩類を覆い、そのすぐ下には基盤の花崗岩類や新第三系中部中新統が存在する(今田ほか, 1987)。

酢川の源流となっているのは、温泉街を横断して西へ流れる5本の川、すなわち北から河原川、一度川、二度川、三度川及び祓川である。南端の祓川を除く4河川沿いには源泉が多く分布し、それぞれ源泉群を構成している。泉質は酸性・含鉄硫黄アルミニウム硫酸塩・塩化物泉に属し、pHは1.6~1.9、溶存成分に SO_4^{2-} が概ね1,000~4,000mg/lと多量に存在する強い硫酸酸性である(山形温泉協会編, 1973; 東海林・田宮, 1990)。このような温泉水を多量に含んだ支流を集めて流れる酢川の水もまた硫酸酸性を示す。調査地域に

おける酢川の水は、現地で測定したところpHは
2～3.5程度で、塩化バリウム溶液を加えると硫

酸バリウムの白濁を生じた。

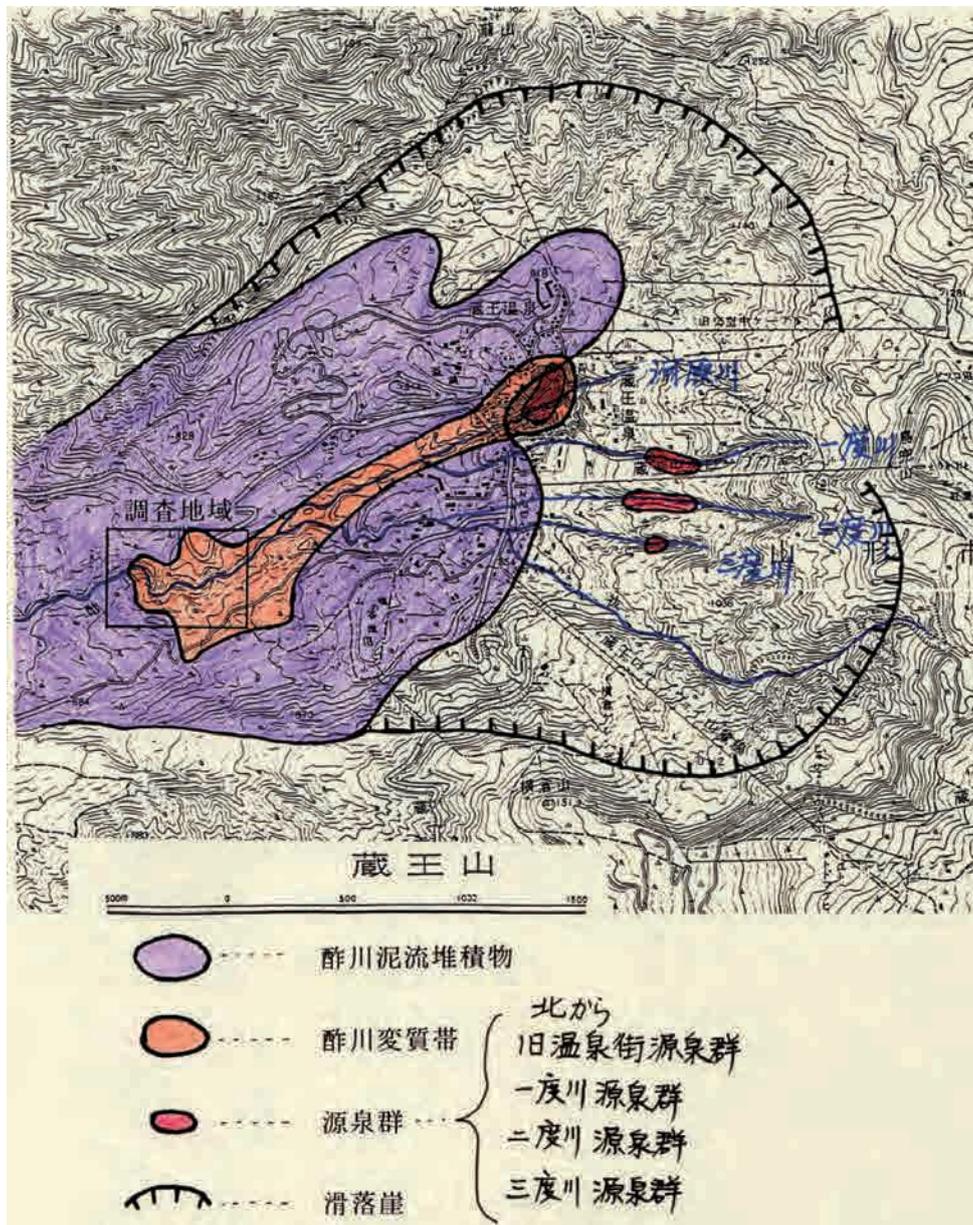


図1 調査地域の位置と周辺の地質図
(地質調査所, 1989; 東海林・田宮, 1990をもとに作成)

3. 調査結果

(1) 調査地域について

調査地域の概略図を図2に示す。この地点の東側、つまり上流には2段の堰堤が作られ、その上の両岸は急な崖が続く。これら両河原の崖露頭は、概ね 変質を受けた褐色の斜面を露出している。図中の露頭Gで石膏が多く産出するが、その対岸の露頭（粘土化変質）では産出が少なく脈状の

黒色変質も見られる。東の堰堤より上でも石膏の産出が確認される。露頭Gより30mほど下流側に露頭Aがあり、ここでは石膏の産出は少ないものの脈状に累帯した変質の状態が異なる部分が観察される。石膏の産状や特徴の記載は長澤・大場（1989）に詳しいが、今回は粘土化変質の強度と石膏産出の有無との関係に特に注目して調べることを試みた。なお、日本地熱資源開発促進セン

ター (1978) は、酢川変質帯を含めた蔵王火山北西地域一帯の一連の変質帯を表1のように分類している。そのうち粘土化帯については、弱・中・強変質帯という呼び方をしているが、露頭観察を行った限りでは、帯というには変質の機子が局部的に細かく異なっているので、今回は弱・中・強変質部という言葉を使用した。ただし、分類の基準は同じものとする。

図2の露頭Gには、地球環境学科の野外実習で毎年訪れている。1991年の調査当時にはこの露頭に簡単に近づくことができ(写真1)、石膏も容易に採取することができたが、今から7~8年前の豪雨によって酢川の流れが変わり、露頭前に流路が変わって露頭自体も浸食されるようになった(写真2, 3)。その結果、現在は露頭の観察が非常に困難となっている。

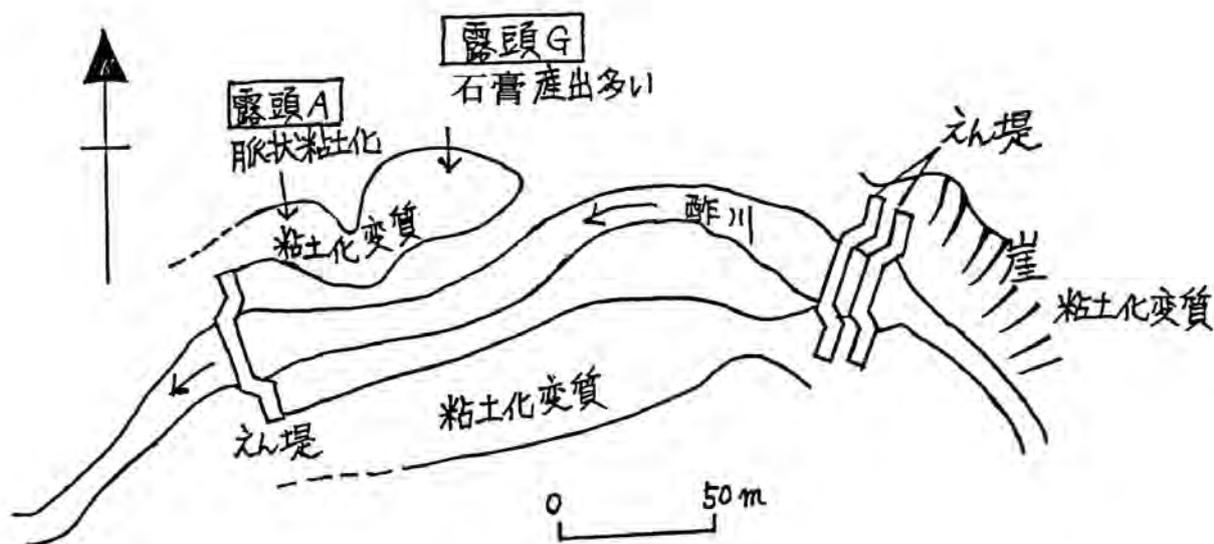


図2 調査地域の露頭の様子

表1 蔵王温泉周辺の変質帯の区分 (日本地熱資源開発促進センター, 1978)

		外観性状	主要構成鉱物
粘土化帯	弱変質	原岩の構造はほぼ残っており、長石は変質。	モンモリロナイトを主として、原岩の斜長石およびクリストパライト・石英・カオリナイト・セリサイト・ゼオライト等を含む。
	中変質帯	石基部は部分的に変質、原岩の構造は残っている。	カオリナイト・ハロイサイトが比較的多く、モンモリロナイト・セリサイト・明ばん石・石英・クリストパライト等を含む。
	強変質帯	原岩の構造は消失し、ほとんど粘土になっている。	カオリナイト・ハロイサイトを主としてセリサイトを含むもの。およびほとんどモンモリロナイトからなるもの。
珪化帯	弱珪化帯	原岩の構造は完全に残っているが、堅硬となっている。	石英・クリストパライトがあり、斜長石・モンモリロナイト等を含む。
	中珪化帯	石英脈とうSiO ₂ の添加が認められるもの。	トリディマイト・石英・クリストパライトを含み、ハロイサイト・明ばん石・黄鉄鉱等を含む。
	強珪化帯	ほとんどSiO ₂ のみからなる堅硬または多孔質岩。	トリディマイト・クリストパライトを主とするもの、および石英を主とするもの。
黒色変質帯		温泉作用でもたらされた黄鉄鉱化帯	



写真1 露頭Gの様子（1991年）



写真2 露頭Gの現在の様子（右奥にある茶色い露頭、2015年）



写真3 露頭Gの近接写真

(2) 露頭観察の結果

露頭Gのスケッチを図3に示す。全体的に黄色色の脆い粘土であるが、所々に変質のあまり進んでいない岩石ブロックが残って突出している。この露頭における石膏の産状をまとめると次のようになる。粘土化変質の分類（表1）に従えば、石膏は中強変質部で褐色～白色を呈し、ハンマーをあてがうと脆くくずれる程度の所に多く産する。おそらく母岩の節理や亀裂、隙間であっただろうと思われる部分に、結晶が脈状に配列していることが多いが、密集して不定方向に成長した産状を見せることもある。また、ときに弱変質部といえる岩石ブロックのところでも、その節理や亀裂に沿って薄い結晶がはりついていることがある。結晶形は数mmの小針状や粒状のものから、長径が数cmにもなる菱形状、柱状、平板状、長板状などがあり、燕尾式双晶も発達するなど様々な形態を示す（写真4）。色は半透明で白灰色を呈し、

結晶内には微量の不純物を包有している場合が多い。

露頭Aでは全体的に石膏の産出は少ないものの、露頭Gにおける無秩序な変質状況とは異なり、露頭中腹部において大きく脈状に粘土化が進んでいるのが観察される（図4、写真5）。かなり強く変質したと思われる、粘性のある白～灰色粘土の脈が横にのび、この上下には淡黄土～茶色、ときには淡緑色を呈する脆く崩れる粘土が存在する。上部は急斜面で調査が困難であったが、見上げたところ粘土化が続いており、あちこちに弱変質岩石ブロックが突出している。白～灰色部は水分が多く強い粘性があり、手に取れば様々な形に変形できるほどである。黄鉄鉱や石英の粒が多く含まれているが、石膏の存在は確認できない。この強変質部をはさんで、上下の褐色粘土である中変質部にも石英が含まれているのがわり、また小さな石膏の結晶が産出するところも一部ある。下の岩石の粘土側に近い部分は、ハンマーでたたけば簡単に破碎できるほど脆弱化しているが、粘土から離れるにしがたい強固な母岩の構造を残しており、造岩鉱物の結晶も肉眼で確認できる。

この露頭を細かく観察して色やと硬さで判別したところ上部から8つに分類できた（図4）。①～⑧の部分について観察結果をまとめると、表2のようになる。露頭Aにおいては他にも、小規模ながら脈状に粘土化が行われた部分が数カ所で見られる。



図3 露頭Gのスケッチ



図4 露頭Aにおける脈状粘土化帯とサンプリング地点



写真4 代表的な透明石膏の写真
左：燕尾式双晶、中：二つに分かれた双晶、右：平板状結晶

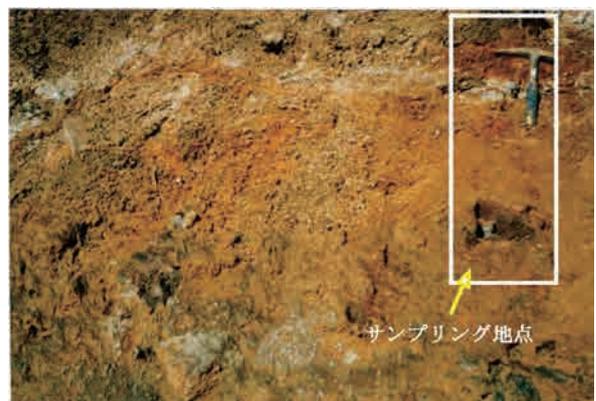


写真5 露頭Aの写真

(3) 母岩について

酢川変質帯が位置するのは岩屑流が堆積したところで、特に石膏が産出する地域は、滝山起源の玄武岩質の岩塊が多い（長津・大場，1989）とされているが、母岩の特徴を詳しく知るために、調査地域からできるだけ完全に組織を残している岩石を採取した。それらを薄片にして詳しく顕微鏡観察を行い、大きく3つ（弱変質岩、中間タイプ、変質岩（写真6～8））に分けることができた。弱変質岩の観察から、母岩は斜方輝石・単斜輝石安山岩と命名することができ、組織は斑状でインターグラニューラーを呈す。また斜長石と単斜輝石について、EPMA分析によれば、斜長石はアノー

サイト、単斜輝石は普通輝石の範囲に入ることより、母岩はCaの多い造岩鉱物に富むことが確認された。調査地域内の岩石は、ほとんどフレッシュなものから、母岩の組織をかるうじて残しつつ、亀裂や節理に石膏を伴っているようなものまであり、様々な変質段階を呈する。中間タイプにおいて方解石は、変質しかかった単斜輝石の内部や周囲に見られることが多い。また同岩石中の黄鉄鉱は塊状に点在するが、変質岩になると脈状に存在する場合が多くなる。変質岩において石膏は不規則なわれ目に沿って生じており、石英は玉ずいのような放射状の結晶形を呈するものが多い。

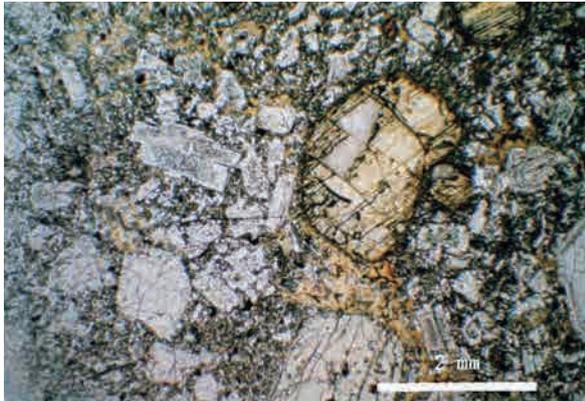


写真6 弱変質岩の顕微鏡写真
中央の輝石やマトリックスが少し変質している。

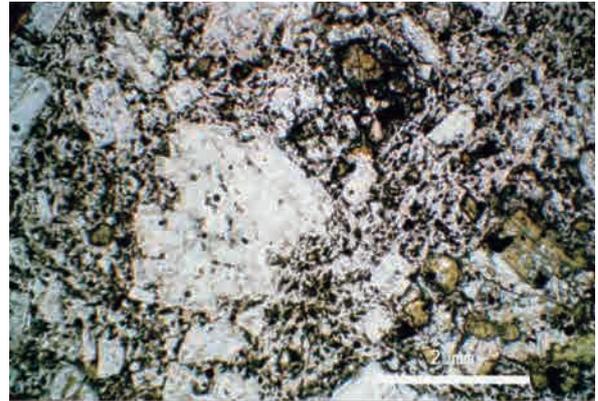


写真7 中変質岩の顕微鏡写真
輝石が強く変質して粘土鉱物になっている。

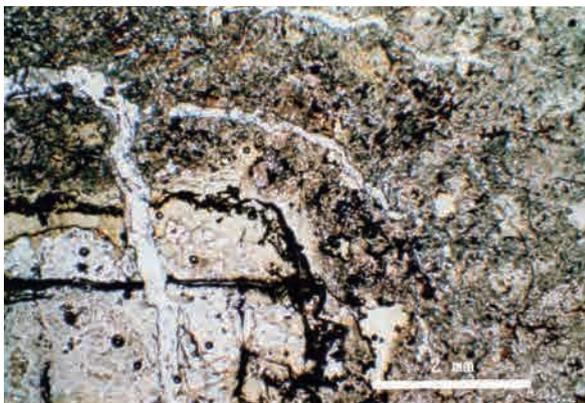


写真8 強変質岩の顕微鏡写真
もとの結晶の形はほとんど失われている。白く見える脈には石膏が、黒く見えるところには黄鉄鉱が生じている。

4. 石膏を生成したCaとSの起源について

薄片が作れた試料を使い、鉱物のモード分析とEPMA分析から岩石全体の成分量を計算した。その結果を弱変質岩、中間タイプ、変質岩で比較したのが図5である。これから注目すべきは、3タイプの岩石にわたって鉱物間を移動しているCaと、変質岩におけるSの増加である。まず、弱変質岩中のCaは主に斜長石や単斜輝石に含まれるが、中間タイプではその約14%は方解石に、変質岩ではその約37%までもが石膏の生成にまかなわれるようになる。しかし、図5に見るように3タイプ通しての全体のCaO量はほとんど変化しておらず、方解石や石膏を生成したCa成分は岩石

中を狭い範囲で移動したもので、母岩起源であることを強く示唆していると考えられる。また、変質岩において石膏や脈状の黄鉄鉱を生成したS成分は、元来母岩に存在していた量からは大きく増

加していることから、 SO_4^{2-} を多量に含む温泉水により、外部から加わったものであることが確認されたと考える。

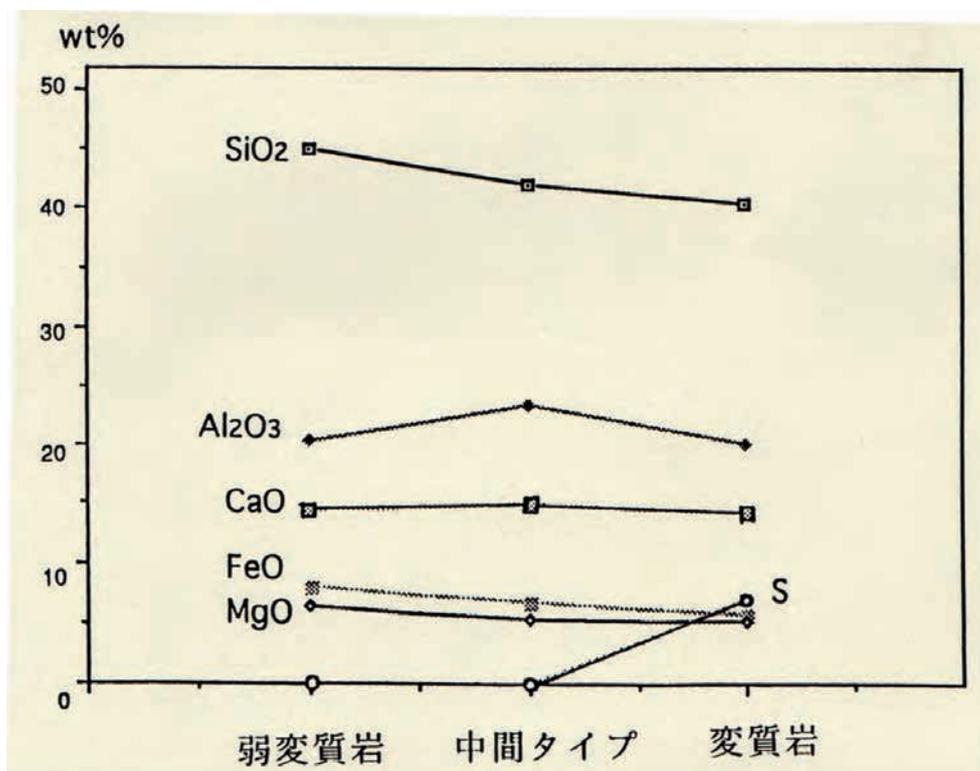


図5 岩石の主要化学成分の変化
岩石のモード組成と鉱物の化学組成から求めた。

5. 変質強度と石膏産出の関係について

脈状粘土化帯における①～⑧のX線回折結果と露頭観察の結果（表2）を照らし合わせてみると、あまり変質の進んでいない岩石部の⑦・⑧には斜長石のピークが大きく現れているが、粘土部の①～⑥ではそれはなく、かわりに石英のピークが顕著であることがわかる。これは、変質が進むにつれ母岩の造岩鉱物を構成しているCa, Fe, Mgなどが溶脱されるため、残留物中にはSi成分の割合が多くなり、それが再結晶して石英になったものと思われる。粘土部でも薄片にすることができた①, ③, ⑤については、顕微鏡下においても石英が様々な結晶形を呈して確認される。

モンモリロナイトのピークは①～③, ⑤～⑦にあらわれているが、これに対して④にはまったくといっていいほど現れてはおらず、カオリナイト

のピークのほうが顕著である。④は脈状粘土化帯の粘性が強い白灰色部であり、この部分の粘土はカオリナイト化していると考えられる。後述するように変質度が強いところほどカオリナイト化作用が進行することから、①～⑧の中では④がやはり最も強く変質を受けており、それから離れるにしがいい変質度が弱まっていることがわかる。おそらく④のところにはもともと大きな亀裂があって、母岩をこのように変質させる酸性の強い水が多く通ったのだろうと考える。

また③だけに石膏のピークが現れているが、①～⑧の試料を詳細に観察しでも、やはりそれ以外には石膏の結晶は認められない。しかし③は石膏を無視すれば、ピークの現れ方は①, ②, ⑤などとあまり変わりはない。このように変質度はほとんど同じと考えられるのに、なぜ石膏産出の有無

が起こるのであろうか。

この脈状粘土化帯に限らず、露頭Gやその対岸についての調査結果もあわせて、石膏が産出する部分としない部分では、どう異なる特長があるのかを詳しく見てみた。

まずX線回折のデータから総合すると、石膏が産出する場合、粘土鉱物は主にモンモリロナイトであるが、カオリナイトも少量認められる。重要であると思われるのは、粘土鉱物がカオリナイトだけになってしまった部分では、石膏は例外なく産出しないということである（表2）。

石膏が産出する部分の試料は、手に取って見ると崩れやすく、間隙の多い脆い性質をしているこ

とがわかる。薄片にできたものを顕微鏡で見ても、やはりひび割れなどのすきまが多く、そういうスペースに沿って石膏を晶出しているのである。一方石膏が産山しない部分は、粘土の細かい粒子が緻密に固まっていて間隙がなく、石膏の結晶成長には適していないように見える。従って石膏の生成には、間隙の有無という要素が大きいのではないかと考える。調査地域の母岩は岩屑なだれの堆積物であるから、流下した岩石が大小に崩れ、一部は粘土化しながら堆積していた。このような堆積物には粘土化の強いところや岩石の間隙がさまざまに発達し、その後の変質に大きく影響したと考えられる。

表2 露頭Aにおける脈状粘土化帯の試料の特徴

	No.	色	肉眼観察	X線回折結果							顕微鏡観察結果	
				モンモリロナイト	カオリナイト	石膏	黄鉄鉱	石英	斜長石	輝石		
粘土部	①	淡黄土	水分が少なくボロボロと塊状に崩れる。緻密で固まっており、押しつぶすとパウダー状になる。石膏はほとんどない。	◎	○			◎				斑晶の痕跡が残る。石英と方解石が少しある。
	②	黄土		◎	○			◎				薄片できず
	③	赤茶	①②よりも水分を含み、多少粘る。粒度が粗く、脆く崩れる。非常に小さな石膏結晶が多い。	◎	○	○		○				母岩の組織は全く残っていない。石英があり、脈状に石膏がある。
	④	白～灰色	水分がかなり多く粘りが強い。小さな黄鉄鉱の粒や、数ミリ大の石英の結晶が多い。石膏は産しない。		○			○				薄片できず
	⑤	茶	多少水分があり粘る。粒度は細かく緻密である。石膏は産しない。	◎	○			○				母岩の組織は全く残っていない。石英があり、沸石様のものがある。
	⑥	淡緑	水分少なく緻密で硬い。非常に薄い脈で存在する。石膏は産しない。	◎				○				薄片できず
岩石部	⑦	茶	母岩の組織を残し、長石の結晶は肉眼で観察できるが、ハンマーでたたくと簡単に崩れる。石膏は産しない。	○						○	○	長石は残っているが、有色鉱物は変質。マトリックスに玉ずい(?)、脈状に方解石と黄鉄鉱あり。
	⑧	黒	肉眼では、母岩の組織がそのまま残り、強固である。造岩鉱物の大きな斑晶が確認できる。							◎	○	ほぼ母岩の組織を残しているが、ところどころ変質。
				◎多い、○ふつう								

6. 石膏と粘土鉱物の生成環境について

図6は、Ca-C-O-H-S系におけるEh-pHダイアグラムである。石膏は、pHが約4～6のやや酸性側で安定であるが、pHがより低くなると溶解してしまうことがわかる。方解石は石膏よりもpHが高い環境で安定に存在する。図中の④⑤⑥について、

④は磁鉄鉱の安定領域で、母岩の玄武岩中にある磁鉄鉱が安定に存在する範囲

⑤は石膏の安定に存在する範囲

⑥はカオリナイトの安定に存在する範囲

となる。また④では斜長石や方解石も安定な領域なので、露頭Aの①や⑦の環境である。⑤は石膏とモンモリロナイトが安定に存在するので、露頭Aの③の環境を示している。

⑥では酸性が強く、カオリナイトと黄鉄鉱と一緒に存在するので、露頭Aの④の環境を示している。このように、露頭Aでは脈状変質の④が最も酸性が強く、その両側に離れるにつれて弱酸性～アルカリ性になっていることが分かる。

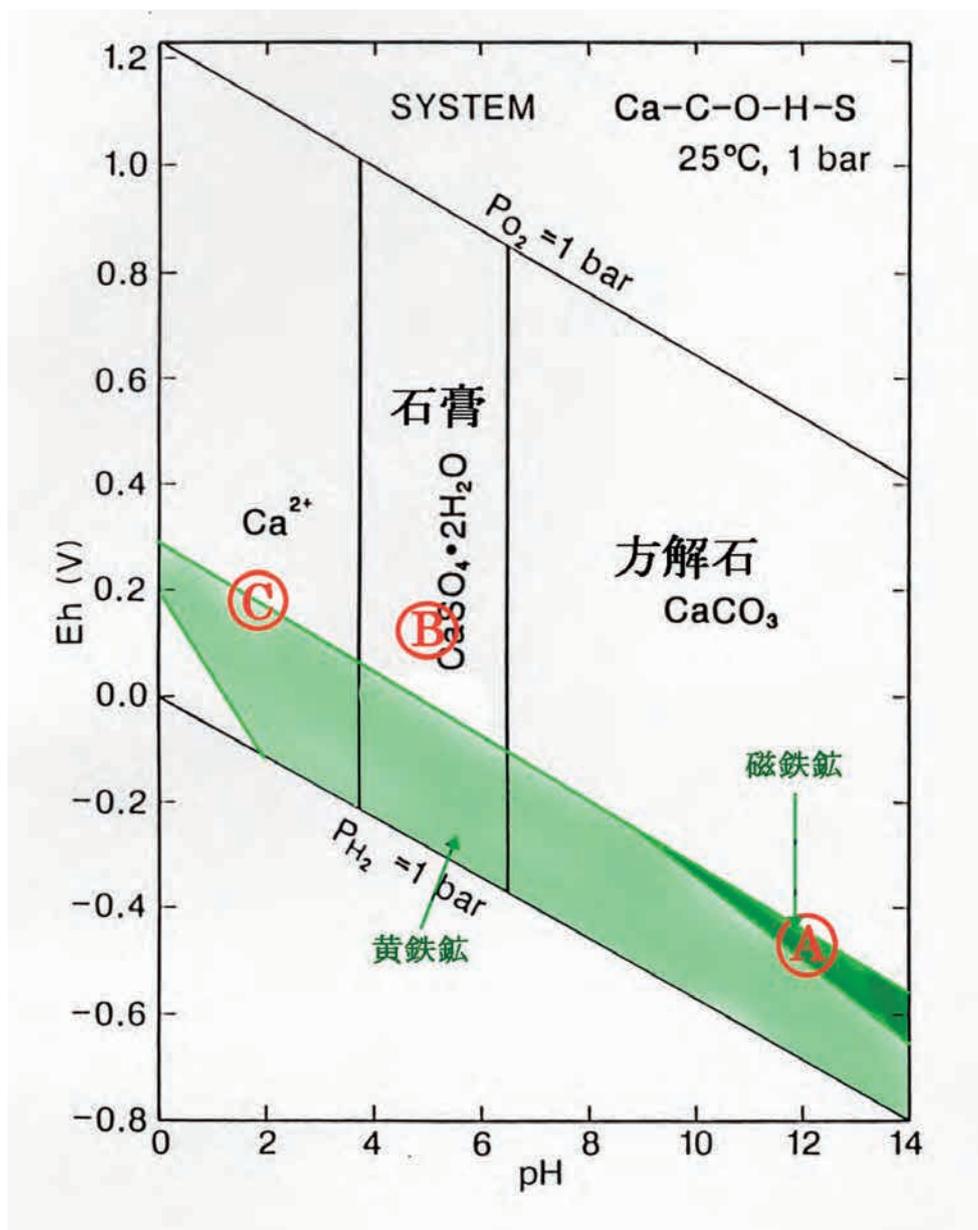


図6 Ca-C-O-H-S系の安定領域 (Brookins, 1988をもとに作成)
Fe-S-O-H系の磁鉄鉱、黄鉄鉱の安定領域を合わせている。

7. 結論

1. 酢川変質帯における石膏は、強い硫酸酸性をしめす蔵王の混泉水中の硫酸イオン (SO_4^{2-}) と、主に母岩起原のCa成分が結びついて生成されたものである。
2. 酢川変質帯における石膏は、母岩中にモンモリロナイトが多く、カオリナイトがわずかに含まれる程度の変質段階にある粘土中、ま

たは岩石中に産出するが多い。しかも石膏が多産するところの母岩は、特にCa成分に富み、亀裂などによる間隙が多く、温泉水が浸透して結晶が成長しやすい性質であった。

3. 母岩が強い酸性化による変質を受けて、粘土鉱物がほとんどカオリナイトだけになった部分では、石膏は溶解してしまうので産出しない。

引用文献

阿子島功（1985）蔵王火山の侵蝕過程. 山形県総合学術調査会「蔵王連峰」, 344-353.

阿子島功・山野井徹（1985）蔵王火山西麓の酢川泥流の発生年代. 東北地理, 37, 159-165.

Brookins, D. G. (1988) Eh-pH Diagrams for Geochemistry, Springer-Verlag, 17, 81, 176p.

地質調査所（1989）日本の主要地熱地域の地質と温泉・変質帯分布. 地調報告、第270号、253-267.

市村 毅（1957）滝山火山の活動. 山形大学紀要（自然科学）, 4, 287-297.

今田 正・大場与志男・土肥浩巳・玉井ます美（1987）山形市東部, 滝山火山の地質と岩石. 岩石鉱物鉱床学会誌, 82, 345-351.

長澤一雄・大場与志男（1989）蔵王温泉酢川変質帯から産出した透明石膏, 山形県立博物館研究報告, 10, 43-45.

日本地熱資源開発促進センター（1978）地熱開発精密調査報告書, No. 2、「蔵王」. 356p.

東海林辰雄・田宮良一（1990）温泉今昔物語, 地熱エネルギー, Vol.15, No. 3, 241-248.

山形温泉協会編（1973）山形県温泉誌. 山形県温泉協会、541p.