

## 蔵王半郷の活断層地形に現れた道路法面の地質と構造

山野井 徹\*

### はじめに

2007年秋, 山形市蔵王半郷地内(大鳥居の北)の蔵王温泉へ通ずる道路の改良工事に伴って長さ約100mにわたって良好な露頭が出現した。この場所は都市圏活断層図において, 地形的に「半郷活断層」(八木ほか, 2002)とされ, その境曲構造の及ぶ範囲の中にある(図1)。したがって, 境曲崖とされる部分の切開状況が観察できる場所であり, 地質学的に「半郷活断層」を検討する好機でもあった。また, この区域の南部の南坂地区では道路の切り取りによる露頭が出現し, 地質が知られているが, この区域の地質については不明であった。この法面(露頭)はすぐに保護されて現在は見る事ができないが, 被覆前に, 地質とその構造について詳しく観察することができた。その結果を記録写真とともに報告し, この露頭にまつわる活断層や地質, さらに応用地質などに関する所見を述べておきたい。なお, 本露頭観察に同行され, 種々の議論を頂いた本田康夫氏にお礼申し上げる。

### 調査結果

#### (1) 岩質

調査区域の全景は図2のとおりであるが, 調査は, 2007年10月下旬から11月上旬に行った。全般に地層(単層)の厚さは数cm~数mで, 層理面は凹凸があり, 不明瞭なことが多い。また, 地層の色については後述するが, 全体として, 白, 桃色, 紫色, 暗青灰色, サビ色などが卓越し, 他にあまり例を見ないカラフルな露頭である。

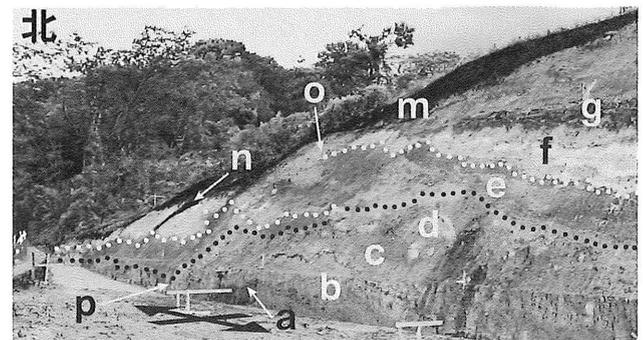


図3 露頭北側の状況で背斜構造が認められる  
(記号は本文の記載参照)

この区域で切り取られた露頭の北寄りに図3のように背斜構造があり, この露頭での最下位の地層が露出している。この部位から上位へ主な地層についてa~oの記号を用いて記載していくが, それらの位置は図3(露頭北側), 図4(露頭中央), 図5(露頭南側)の中に示した。

aは黒色で, 黄鉄鉱の密集したノジュール状で硬く, ハンマーの打撃で火花が良く出る(図3)。aの右側は同層準であるが, 茶色の軟質の粘土相(100cm以上)に変わる。aの最上部は赤褐色の薄層(0~30cm)が不規則におお。

bは下位は灰白色の礫混じり粘土(約40cm)で一見白色凝灰岩の風化層に見える。上位は青灰色(30~40cm)で部



図1 活断層地形(八木ほか, 2002)内に切られた道路法面の位置(○)×は南側の切り取り法面

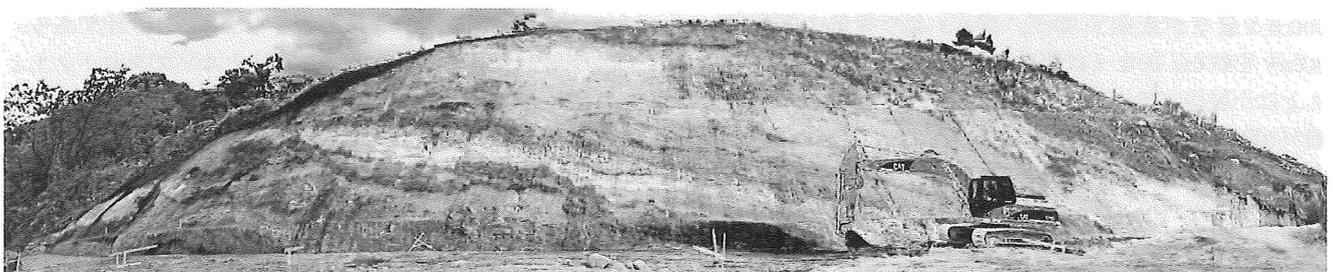


図2 切り取り法面全景 右(北)側に背斜軸をもち, 半固結の色彩豊かな地層

\* 山形大学理学部地球環境学科

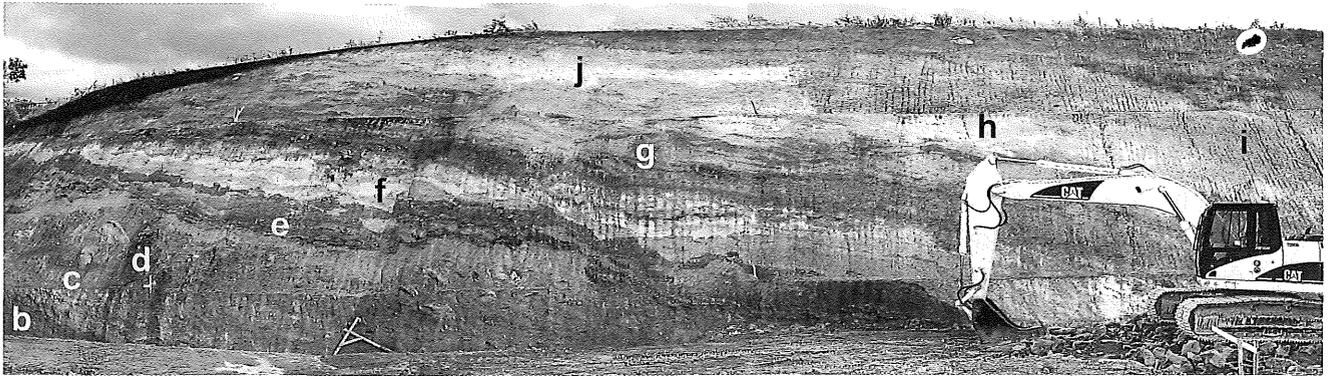


図4 露頭中央部 e:青灰色, f:白色で明るい帯は桃色, g:暗紫色, h:白色でレンズ状に桃色やサビ色  
(記号の詳細は本文参照)

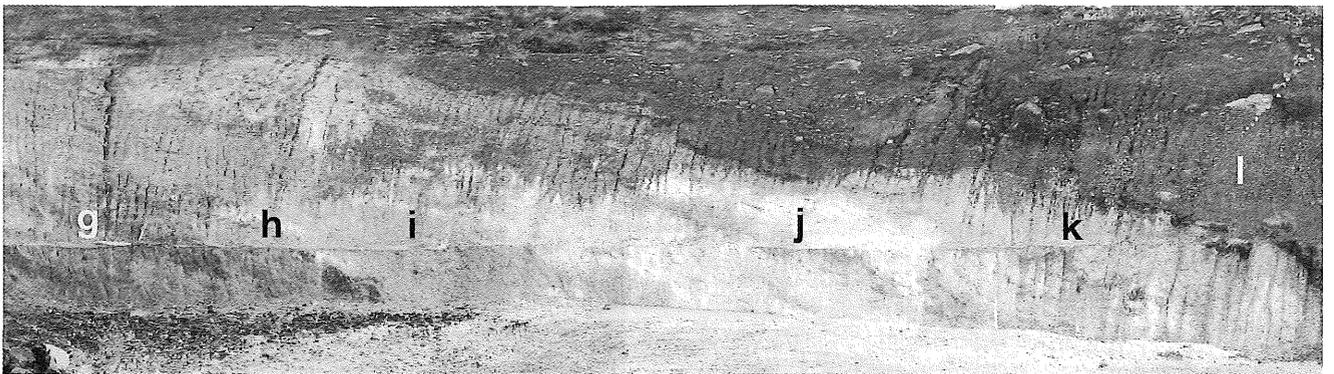


図5 露頭南部 i:灰白色, j:白色で明るい部分は桃色, k:桃色で部分的に白色やサビ色, l:暗紫色  
(記号の詳細は本文参照)

分的に金色の黄鉄鉱が認められる。最上位はチョコレート色の3~20cmの帯が凹凸をもって狭在する。bは共通して安山岩の角礫を交える。

cは下位は灰色から褐色の細粒の円礫を含む礫凝質砂岩(30~40cm)であるが、上位へ不淘汰な円礫を含む礫岩層(d)(40~100cm)へと漸移する。したがって、cとd層は一連の逆級化の粘土混じりの砂礫層である。

eは色によって3層に分けられる。最下部(e1)はシルト混じり砂岩のレンズで暗青灰色(部分的に茶灰色)を呈する。その上位のe2, e3は共に20~40cmで、角礫入り粘土混じり砂層であるが、e2は暗青灰色で、白色のラミナが見られる。上層(e3)は褐色を帯びた暗灰色になるが、e2との間に不規則(0~30cmのレンズ状)に白色~桃色を帯びた部分を挟む。

fは白色の砂混じり粘土で風化が進み軟質である。20~300cmと層厚が変化するが、2~3本の桃色の帯(10~30cm)を挟む。eとfは明確な境界で接する。

gは小粒径(数cm)の安山岩角礫にとむ灰色の角礫凝灰岩(100~300cm)であるが、基質部は礫と同質の粗粒砂からなる。暗紫色を呈する10~30数cmの帯がラミナ状に数本入るが、下位は10~50cmのさび色の帯をなして、凹凸をもって、f層と明確に接する。

hは白色~灰色の礫混じり砂で、200~0cmと、露頭中央部でレンズ状に入る。白色凝灰質礫岩状の見かけを呈する。礫は一見流紋岩様であるが、安山岩質の構造を残し、

軟質化している。帯状に桃色部、レンズ状にさび色部がそれぞれ介在される。

iは灰白色の角礫に富む角礫凝灰岩である。露頭南側で厚く約200cmであるが、中央部でせん滅する。

jは層露頭全般に100~200cmの地層として見られ、岩質はiと同様であるが、桃色化が顕著で部分的に白色やさび色部分がある。桃色部の上位は南側で粘土化が著しい白色部(k)がのる(0~100cm)。kの上に暗青灰色の黄鉄鉱に富む部分がある。

lは露頭南部の最上部にあつて、それ以下とは岩質が大きく異なる。すなわち、未風化の安山岩の淘汰不良の亜角礫(径50cm以下)を含む固結度の低い地層である。基質は暗紫色の安山岩質の砂礫で、その量は礫質部よりも多い。

lの最下部は下位のjを削り、取り込んでいる。厚さは露頭の上限まで5m程度認められる。

mは露頭北部の最上部の表層をなすクロボク土である。クロボク土の下位は一部ローム質土となってクロボク土と共に下位層を侵食面をはさんで不整合のようにおおう。露頭北側のnではf層のくさび状の割れ目があり、そこを表土を形成するクロボク土が充填している。

## (2) 地質構造

本露頭の地質構造は前述のとおり、露頭の北側に背斜軸が観察される(図3)。露頭の各位置で測定した走行・傾斜は図6のとおりである。測定された構造は背斜軸以南で

はN50°~90°W, 20°~35°S (代表的な構造は図6の下の写真)であるのに対し、背斜軸以北では一定の傾向を示さない。これは図3にも現れているように層理面にかなりの凹凸があり、局所的な構造を示しているからである。また、

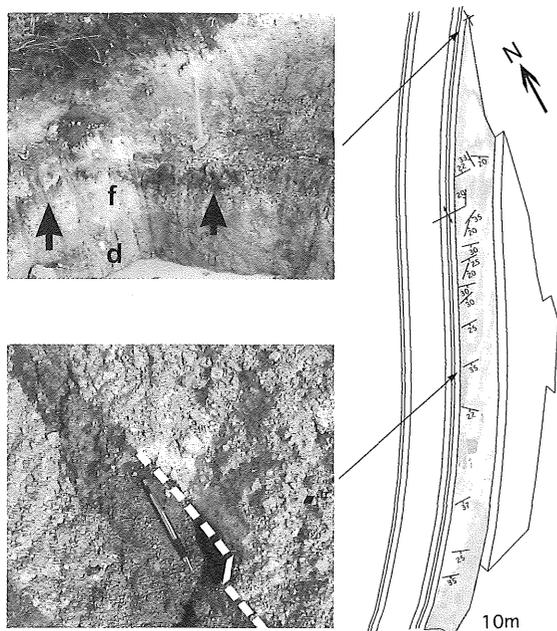


図6 露頭各地点の走行・傾斜平面図(右) 写真上:露頭北隅で、d, f層(黒色層部に矢印)の水平構造が確認される。写真下:南翼の代表的構造

露頭の状況からも、大局的には背斜構造であるが、一部は複雑な変形をしている(詳細は後述)。

図3のp以北はd~f層が露頭では水平に見える。これらの地層は露頭北角で、法面に直角に切り込まれた露頭(図6の上の写真)においてf層の上面(2つの矢印)が黒色の地層として水平に追跡される。また、この直角方向の法面ではそのほかの葉理も水平に現れていたことから、p以北でのd~f層は水平層であることが確認される。

図3の中でd層の上面を黒い点線、e層の上面を白い点線でそれぞれ示した。このうち、一見、e層の上面はoの先が下方にあるe層の上面に明確に追跡できない。また、e, f層の厚さはこのo付近での増減が著しい。そこで、この付近より北側の地質構造(図7の下)を詳しく観察した。その結果、図7の上図のような断層・褶曲構造が明らかになった。すなわち、dの上面を断層すべり面として、e~hの地層が2本の、断層を伴って褶曲している。こうしたe~hの変形は小規模なデコルマであり、d層以下の変形とは独立した変形である。

## 考 察

### (1) 地層の帰属

この区域の地層はそれぞれ色彩が豊かであり、その色によって岩質の特徴が共通している。すなわち、黒色~青灰色の地層では黄鉄鉱が認められ、紫~茶色系の地層は安山岩質の火砕流もしくは泥流状である。白色部では、白色凝

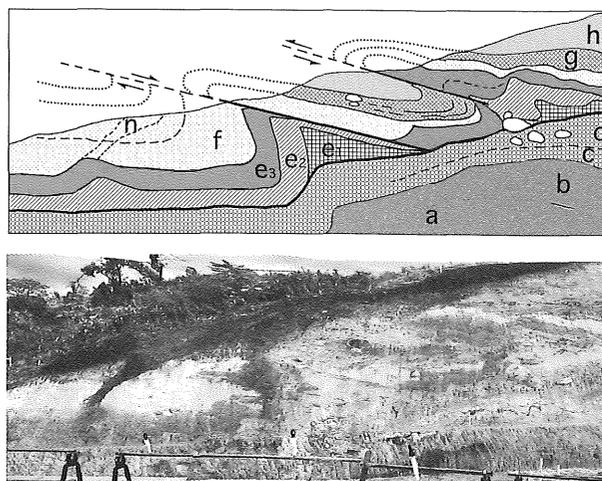


図7 背斜北翼付近の複雑な変形構造(デコルマ) 上の図は下の写真の範囲の表土を除いて図解したもの

灰岩の風化が著しい岩質にみえ、その一部が桃色に変わっている。

岩質は半固結で、一般的な新第三系より固結度は低い。周辺地域の類似する堆積物としては、蔵王二度川に見られる温泉変質を受けた地層、鳴の谷地沼下方の地すべり地で見られる地層、あるいは蔵王温泉に近い同志平近くの酢川沿岸に分布し、一部に石膏を含む「酢川変質帯」の地層(長澤ほか, 1989)があげられる。また筆者は、同様な岩質で、石膏を含む地層を上山市小倉と山形市蔵王上野間の酢川橋上流左岸で観察した。このように同質の地層が蔵王温泉から下流へ酢川沿岸で観察されることから、この区域の地層は蔵王温泉周辺で温泉変質を受けた岩体が土石流もしくは泥流等となって移動・堆積したものと考えられる。

移動・堆積のユニットは前記の同一岩質の単位に対応すると思われる。しかし、同一岩質であって、色の異なる地層は同一流動ユニットとして堆積後、二次的变化を受けたものと考えられる。その根拠は次に述べるように、現在、蔵王温泉の熱水で変質が進行している岩塊の変質状況から類推することができる。

### (2) 蔵王温泉の熱水変質と露頭の色

蔵王温泉の二度川では、温泉水(熱水)が至る所で湧出し、新第三系の安山岩や湖成層の岩体が熱水変質を受けて黒く軟質に変質している状況が見られる。湧出箇所からわずか離れた露頭では、岩体の表面は白色化し、元来安山岩で硬質であった岩石もピックハンマーが容易に突き刺さる程度に軟質になっている。こうした白い岩の表面を少し削り込むと内部にサビ色の部分、さらに内側は黒色部へと変わる(図8)。この色の変化は次のような化学的变化として、理解される。

蔵王温泉の熱水はイオウ(S)を含むことが基本的特徴である。地下深部で熱水は酸素に乏しく硫化水素(H<sub>2</sub>S)が形成される。硫化水素を含む熱水は岩石に豊富に含まれる鉄(Fe)と反応して黄鉄鉱(FeS<sub>2</sub>)粒子を作り、それ

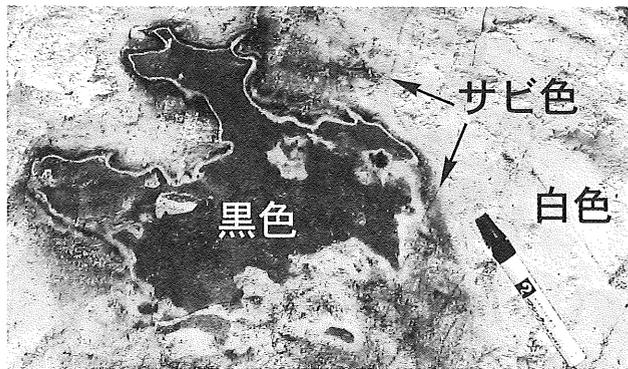


図8 蔵王温泉二度川の熱水変質岩体の酸化環境における二次的変質（表面を削り込んだ断面において、内部の黒色部がサビ色を経て白色になる状況）

が密集して黒色に変質する。蔵王温泉周辺の地下では熱水との反応により広くこうした変質が進行していると考えられる。

このように黒く変質した岩塊が、地表近くの酸化的環境で露出すると、地表水は黄鉄鉱と反応して硫酸イオンを作り、強酸性水溶液となる。こうした強酸性溶液は岩石中の黒色の黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) と反応してさらなる硫酸イオンや  $\text{Fe}_2$  を作る。  $\text{Fe}_2$  は酸化されて、サビ色の赤鉄鉱 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) へと変わる。さらに岩石に含まれているアルカリ金属 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) やアルカリ土類金属 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) を溶かし出し、溶解度が低いシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) などが後に残る。サビ色の赤鉄鉱も溶脱されて色は白に変わる。こうして、還元的环境で熱水変質を受けた黒色岩塊は酸化的環境での変質が岩体の表面から徐々に内側に進行し、それに伴って岩石の色は黒から（途中さび色を経て）白へと変わっていく（図8）。

今回観察した区域の露頭の堆積物は元来蔵王温泉周辺にあって、熱水（温泉）変質を受け、地表付近の一部以外は、ほとんどが還元状態の黄鉄鉱を含む黒色変質岩体であったと考えられる。それが崩壊・流出し、この区域で堆積した際には、黒色の岩屑からなる地層であったはずである。その後、地表部は酸化的環境となって、二度川の岩石のように、表層から白色化を伴う二次的な変質が進行したものと考えられる。こうした二次的変質が進行中に次のユニットの流出物に覆われると、酸化的環境でなくなり、そこでの二次的変質は停止して保存され、新たな二次的な変質の場は上の層の表層に移ったであろう。白色部が厚く発達することは次の流出土塊が覆うまで、かなりの時間が経過したことを意味するし、白色部の中にある桃色部の形成もそうした地表風化の長年の産物として形成されたものと思われる。

このように、蔵王温泉で変質を受け、それが崩壊・流出した堆積物に「蔵王温泉変質崩壊堆積物」と命名しておきたい。

### (3) 「蔵王温泉変質崩壊堆積物」とその層位

蔵王温泉周辺からの崩壊堆積物（地形）としては、市村（1957）の「酢川泥流」、皆川（1959）の「蔵王泥流」、藤

原（1967）の「酢川泥流」、「足口泥流」、「金瓶泥流」、阿子島（1985）の「酢川泥流」などと呼ばれてきた。これらは崩壊物が流出したであろう地形面等から命名され、地質的観察・記載に乏しい名称であった。山野井（2003）は山形ニュータウン建設時に現れた大露頭の観察により、何回かの崩壊ユニットをもつ崩壊堆積物を区分した。さらにそれらが蔵王温泉方面からのもので、「古期崩壊堆積物」と「新期崩壊堆積物」に大別され、後者が酢川泥流堆積物であるとした（山野井，2003）。この酢川泥流堆積物は、様々な色の角礫や円礫とそれを支持する不淘汰で不均一な基質部からなる岩屑なだれ堆積物や泥流堆積物からなるものとされている（山野井，2003）。本区域の露頭で見られた崩壊土の最上部の1層の岩質は、こうした酢川泥流堆積物の岩質に対比されるし、この区域の南に隣接する南坂地区の道路の切り取りによって出現した岩質も同様である。すなわち本区域で見られるように、1層の下位に蔵王温泉変質崩壊堆積物（以後「温泉崩積物」と略記する）が見られることは、この地層が酢川泥流堆積物の下位にくるか、酢川泥流堆積物の中に挟まれるかのいずれかである。

山形盆地西側山地（山形ニュータウン側）の崩壊土塊の中で温泉変質を受けた岩塊としては、古期崩壊堆積物中の「オレンジ崩れ」があげられる（山野井，2003）。他方、新期崩壊堆積物には、その最下位で温泉変質を受けた岩塊を筆者が観察している。その場所は山形ニュータウン建設時に現れた大露頭の南側（上山側）の東側法面である（図9）。この図の左（北）側は古期崩壊堆積物としての「グリーン崩れ」（G）と「溶岩崩れ」（L）であり、それらの侵食期間において酢川泥流堆積物（Z）の最下部が覆って



図9 山形ニュータウンの酢川泥流堆積物（Z）の最下部に取り込まれる黄鉄鉱を含む黒色岩体（矢印）

いる。この岩屑なだれ堆積物の中に黄鉄鉱を含む黒色の泥質岩塊（矢印）が取り込まれていた。

本区域の露頭の温泉崩積物の岩質は砂・泥質部が卓越するので、大礫からなる「オレンジ崩れ」の岩質とは異なり、酢川泥流堆積物（Z）の最下部に含まれる黒色の泥質岩塊と類似する。こうした黒色の泥質岩塊は、山形ニュータウン側でのさらに上位の酢川泥流堆積物にはほとんど含まれないことから、最下位特有の含有物と考えられる。そうであるならば、発生初期の酢川泥流がすでに堆積していた温泉崩積物を削り、それを取り込んで西側山地まで移動させたことになる。ただし、こうした崩壊堆積物の層位関係の

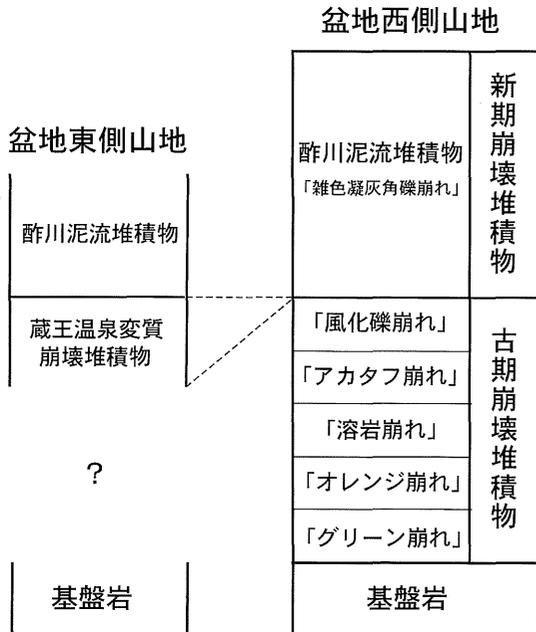


図10 蔵王温泉火山体崩壊堆積物とその層序

鍵となる露頭の数が少なく、今後さらに有効な観察事実を増やすことが望まれるが、これまでに考えられる蔵王温泉の諸崩壊堆積物の層序は図10のようになる。

(4) 断層地形と地質構造

本露頭では図6に示したように、ほぼEW方向の走行をもつ背斜構造がある。背斜構造の南翼はほぼ単純な南傾斜で地層が重なるが、北翼は単純ではない。特にd層の上面をすべり面としたe層以上のデコルマは特異な変形である(図7)。すなわち、この変形は北側からの横圧力によりe層以上が小規模な衝上断層を伴って、d層から分離して滑動したものと考えられる。d層以下の背斜構造の変形もこのデコルマ部分と調和的な位置にあるので、同時に進

んだ可能性がある。すなわち、南北の圧縮応力により、d層以下は背斜褶曲を作り、その上のe~h層はデコルマを形成したと考えられる。



図11 露頭の南側の小規模な切り取り面(位置は図1の×印)でみられる北傾斜の蔵王温泉変質崩壊堆積物

さて、本区域は、地形的に「半郷活断層」(八木ほか, 2002)とされている境曲崖を登る坂(撓みの範囲内)が切り取られた法面である(図1)。このほぼN45°E方向の活断層の影響でこの地層が撓んだとするならば、境曲(褶曲)の走行は活断層に平行であるはずである。しかしながら、すでに述べたように、この露頭の地質構造は東西方向の走行が一般的である。したがって、ここ一帯の丘の構造は地形的な「半郷活断層」から想定される境曲崖の構造(八木ほか, 2002)と、その方向において、約45°異なる。本露頭で求めた走行が東西方向から、多少の誤差をもつにしても45°の差違は大きい。

さらにこの露頭の南側の小規模な切り取り面(位置は図1の×印)において、温泉崩積物の二次風化による白色の堆積物が、北傾斜で露出していた(図11)。このことはこの小露頭と北にある大露頭との間に多分東西方向の軸を持つ向斜構造の存在を示唆している。そうであるならば、この丘一帯は東西の走行を持つ褶曲構造に支配されている可能性もある。



図12 黄鉄鉱を含有する黒色泥岩への法面保護(種子吹きつけ)工における硫酸イオンの関与事例(河北町) 黒色泥岩の層理に沿って植物は枯れ、有機泥が侵食され、金網が溶蝕して裸地化が進行している

## (5) 応用地質的所見

本区域の露頭は蔵王温泉の温泉変質を受け、黄鉄鉱を含んだ黒色の地層が露出したことに注目したい。この地層は切り取られたことにより、酸化的環境に変化した。この状況で、特に問題となるのは地表水との反応である。法面保護工として、法面に金網を張り、その上に有機泥と共に種子の吹付けが行われた場合、次のことが危惧される。すなわち、種子は発芽して当面は法面の緑化が支障なく進行するであろう。しかし、数年経過すると、局部的に植物が枯れてくる。これは地表水が黒色土の黄鉄鉱と反応して硫酸ができて強酸性になるからである。植物が枯れると有機泥の侵食が進み、より地表水が浸透しやすくなって、黒色土の変質が進み、硫酸溶液は鉄製の金網さえ溶蝕して、地層が露出するようになる。こうした例は、温泉変質による岩質に限らず、黄鉄鉱を含んだ海成層においても生ずる。図12は河北町の土取り場の法面保護工が施工後6年を経た例である。植物・有機泥が侵食されているばかりか、金網までも溶蝕され、元来は黒色の泥岩が部分的に白く変質して露出している。ここの地質は凝灰岩を主体とし、黒色泥岩が介在される中新統の葛沢層（海成層）である。保護工の侵食は黒色泥岩層の層理に沿って進行している（図12）。葛沢層は固結度が比較的高いので、このことが直接法面の崩壊につながるとは思われないが、今後、さらに緑化法面の裸地化が進行するものと思われる。

## ま と め

山形市蔵王半郷地内で工事に伴って出現した大露頭は次の新たな知見が得られた。

1. 露頭の地質は蔵王温泉周辺で熱水変質を受けた岩塊が何回も崩壊流出して堆積したものであり、これらは「蔵王温泉変質崩壊堆積物」と命名された。
2. 堆積後の黄鉄鉱に富む崩積土は酸化的な環境で二次的変質が進行し、白色の岩質へと変化した。
3. 「蔵王温泉変質崩壊堆積物」の層位は、蔵王温泉崩壊堆積物のうち、古期崩壊堆積物と新規崩壊堆積物の間、すなわち、酢川泥流堆積物の下位に位置する可能性がある。
4. 本露頭の構造はEW方向の軸をもつ背斜構造をなすが、背斜軸に近い北翼では、デルコマ構造が認められる。こうしたデルコマ構造や背斜構造も同じ南北方向の圧縮

応力による。

5. 本露頭の地質構造から求められるほぼ東西方向の走行は、半郷活断層地形の塊曲構造（八木，2003）から想定されるN45°Eの走行とは、約45°の差違がある。
6. 本露頭の黄鉄鉱を含んだ岩質部での法面保護工は、地表水の浸透による強酸性化の影響が危惧される。

## おわりに

山形盆地は奥羽山脈や出羽山地、それに山形盆地の地形的配列とそれらを作る地層の構造は、第二期圧縮変動によって強まった東西圧縮応力による地層の変形が一般的である（山野井，2005）。このことと、地形的な「半郷活断層」の方向や塊曲崖の構造（八木ほか，2002）は矛盾しない。しかしながら、なぜ、それに矛盾するような地質構造がこの区域の露頭で見られたのか？は今回の事実からは明快に説明できない。また、なぜ、蔵王温泉崩壊堆積物のような新しい（多分50万年よりは新しい）地層が、局部的なデコルマ変形を起こしたのかの原因が不明である。これらを疑問点として残し、将来の解決に期待したい。

## 引用文献

- 阿子島 功（1985）：蔵王火山の侵蝕過程。「蔵王連峰」，山形県総合学術調査会，344-353。
- 藤原健蔵（1967）：上山盆地における泥流堆積と盆地の埋積過程。東北地理，19，15-22。
- 市村 毅（1957）：竜山火山の活動。山大紀要（自然科学），4-2，283-297。
- 皆川信弥（1959）：上山周辺における新第三紀層の層位学的研究。山大紀要（自然科学），4-4，561-573。
- 長澤一雄・大場予志男（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），43-50。
- 八木浩司・今泉俊文・佐藤比呂志・後藤秀昭・松多信尚・越後智雄・丹羽俊二（2002）：1：25，000都市圏活断層図「山形」，国土地理院技術資料D・1-No. 388。
- 山野井 徹（2003）：山形ニュータウン建設で現れた蔵王火山体の大崩壊堆積物。地すべり学会誌，40，78-83。
- 山野井 徹（2005）：山形盆地と外縁山地の形成。第四紀研究，44，247-261。