

5 1. シンクホールと地下水 (2)

(4) 筆者のささやかな経験から

話は本題からやや離れるが、地中水の存在と陥没について、今回の話題に関係すると思われる筆者のささやかな経験から話を起こすことにする。

もうかなり昔のことになるが、我が家の庭の片隅にあった堀井戸を埋め戻してそこにプレハブの物置を建てることになった。井戸は業者の手によって充分注意してしっかりと塞いでもらったつもりであったが、20年を過ぎたころ、その井戸の側壁部分にいつの間にか小さなすき間が出来ていた。気になるほどの大きさではなかったが、念のため砂利を買ってきてこれを塞ごうとしたが、いくら埋め込んでもスカスカと入ってしまう。砂利は、10袋以上は入ったであろうか。知らないうちにいつの間にか地下に空洞が出来ていたのである。筆者が“地下侵食”という現象に興味をもったのはこれが切っ掛けだったと言える。

“千丈の堤も蟻の一穴から崩れる”という喩えの通り、地下侵食と陥没の繰り返しによる孔壁の後退はさらにこの現象の加速的拡大を促す。写真 27, 28 は切り取り壁面でのその状況を追ったもので、崩れは地下水面上の乾湿変化の大きい漏出面 (Seepage face) 付近に集中する傾向が認められる。



写真 27 降雨時のカッティング底部の水分状態



写真 28 同左崩壊発生

(35. 地下水研究 50 年史—斜面災害と地下水—の項で既載。パイプはテンシオメーター)

本稿に述べる以下の事例は“採掘”という人為作用による陥没であるが、何れも地下水の存在が大きく関与しているものとして挙げたものである。なお筆者はこの 2 例とも視察した程度で、公表されている資料に多くを依存していることをお断りしておく。

(5) 岐阜県御嵩 (みたけ) 町の亜炭廃坑に起因するシンクホール

御嵩町は岐阜県南部に位置する旧中山道沿いの宿場町で、木曾川の支流、可児川に沿った落ち着いた静かな町である。この町の地下に“とんでもないもの”が隠されているとは想像もつかない。その“とんでもないもの”とは亜炭採掘によってできた地下空洞

である。それは町の面積の1割近くにまで及ぶのではないかとされている。ここは明治の初めから太平洋戦争の後を経て1967年ごろまで、我が国最大の亜炭の産地として知られていたところで、その後遺症ともいえる陥没事故はこれまでに200件以上を数える。

亜炭廃坑に起因する陥没事故は図27のように日本の他の地域にもみられるが、東海地方は全国でもとりわけその密度が高い。その分布の規模は亜炭層を堆積した鮮新世の東海層群の分布と重なる。

図28がその詳細であるが、亜炭田として盛んに開発された地区はこの地方に数多く存在する。中でも御嵩地区は群を抜き、一時は全国亜炭量の半分近くを産出していたこともある。

御嵩町の陥没事故が大きく報じられたのは今から12年ほど前のことであるが、実際には陥没は太平洋戦争末期から戦後間もなくの頃まで遡ると聞いている。町のイメージを損ねるといったことから表に出し難かったことが窺える。

平成14年に「特定鉱害復旧事業等基金」が設けられ、陥没孔の復旧工事や亜炭廃坑の充填工事がスタートしたが、復旧を要する箇所は多く、事業年度内(平成29年度3月まで)に全体を復旧することは難しい状況にあるのが現状である。



図27 日本の亜炭廃坑に関する陥没事故
(出典：NHK 映像資料)

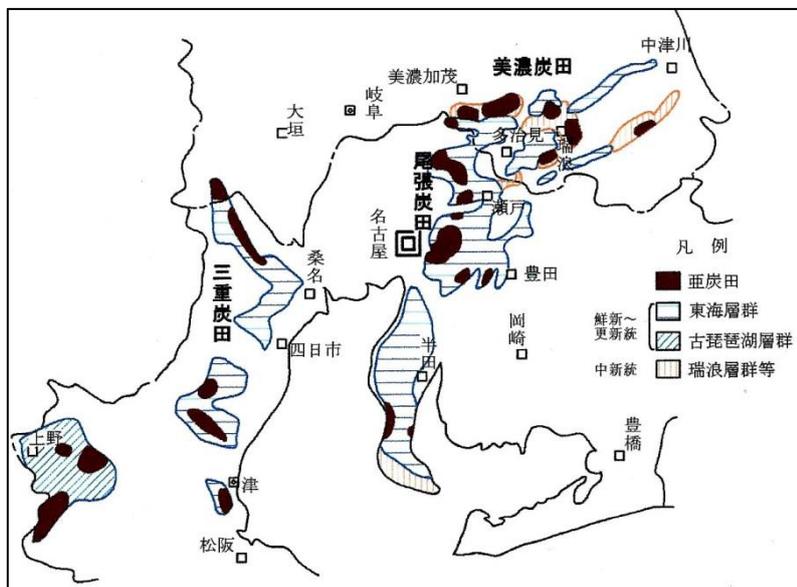


図28 東海地方の亜炭層の分布

[出典：日本充てん協会(2004)：空洞充填施工マニュアル、
—空洞による災害防止と地盤安定化のための技術—]

写真 29 は陥没事故の一例、写真 30 は対策工事（空洞充填）の一例である。これらは何れも規模の大きいものであるが、“浅所陥没”と呼ばれている比較的規模の小さいものは、御嵩町内（写真 31）に数多く存在する（図 29）。

陥没孔には垂炭廃坑が陥没して直接地表に達した場合の他に、廃坑に流れ込む地中水による地下浸食の拡大に起因した比較的規模の小さいものもある。



写真 29 道路陥没
平成 22 年 10 月 顔戸地区で発生
(出典：御嵩町役場資料)



写真 30 路面陥没対策工事
多治見白川線大庭交差点
(出典：飛島・栗山建設共同企業体資料)



写真 31 御嵩町の遠望 (可児公園より)

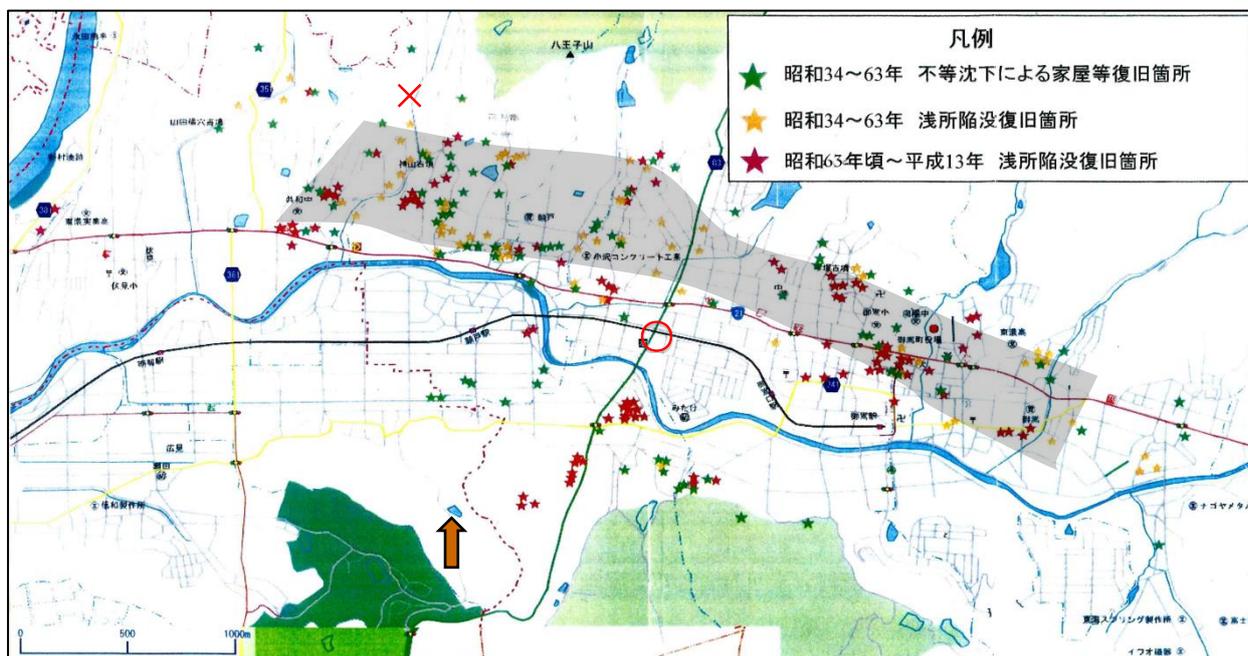


図 29 浅所陥没復旧箇所 (出典：御嵩町役場)
(写真 30 の位置○印、町管理の廃坑×印、矢印は写真 31 の方向、灰色部分は陥没が集中しているゾーン)

町では廃坑の一つを保存管理していて、今後の対策に活かす目的から坑内状態の観察を続けている(図 29×印)。写真 32 はその入り口で、此处は丘陵性の山の末端にあり、土被りはさほど厚くない。写真 33 にみるように、坑道の両側は支保柱として掘り残した亜炭層の柱が並び、それらは地中水の滲出により常時湿っているが、坑道に水が溜まって歩行に支障を来す程ではない。



写真 32 観察用として残された亜炭廃鉱



写真 33 亜炭坑内

亜炭層は水に浸っている状態では安定を保っているが、写真 34 のように乾燥すると、たちまちヒビが入り、間隙が開いて劣化が進行する。なお上の写真は試料採取直後のもの、下は暗冷所での暴露 2 ヶ月後のものである。

御嵩町亜炭鉱廃坑対策室が作成した次ページの空洞深度分布図(図 30)によると、空洞の深さは大きく見て国道 21 号線(中山道)付近を中心として深く、周辺で浅い。このことから大きく見て亜炭層は空洞深度を規定するかたちに堆積しているものと推定され、したがって地下水の存在もこれを反映しているものと推定される。

ここで図 29 の浅所陥没の分布を再度見ていただきたい。この図で特に国道 21 号線より北側に陥没が集中するゾーンが東西方向に帯をなして認められ、そこは上記によって推定される地下水帯の縁辺部、つまり乾湿が繰り返されるゾーンと亜炭層の層準が一致する地区にあたる。



写真 34 乾燥に伴う亜炭層の劣化

図 29 中○印で示した大庭交差点から北約 1100 m の間の地質断面図が飛島・栗山特定建設工事共同体によって作成されているので図 31 にこれを引用させていただきます。

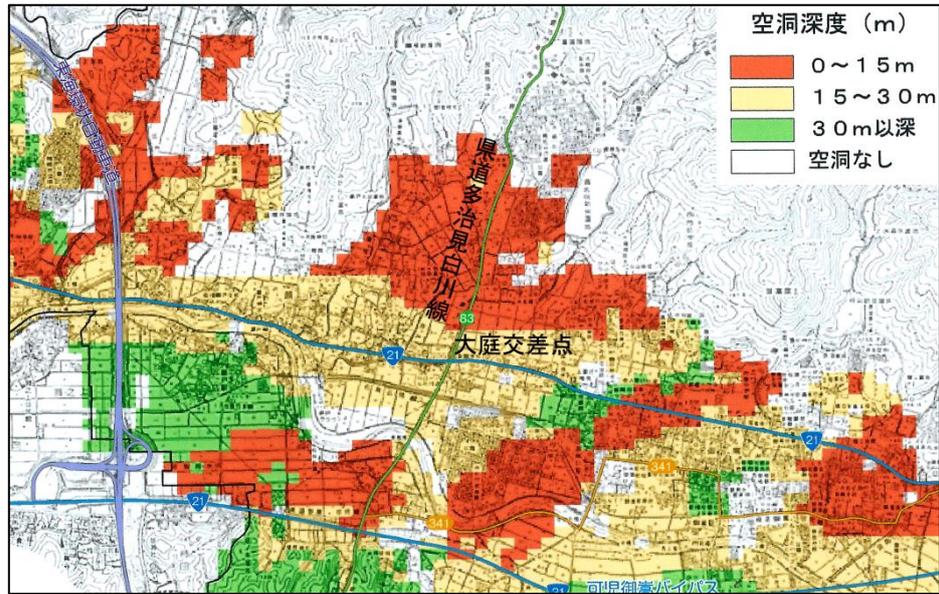


図 30 御嵩町中心部の空洞深度分布図
(出典：御嵩町垂炭鉱廃坑対策室)

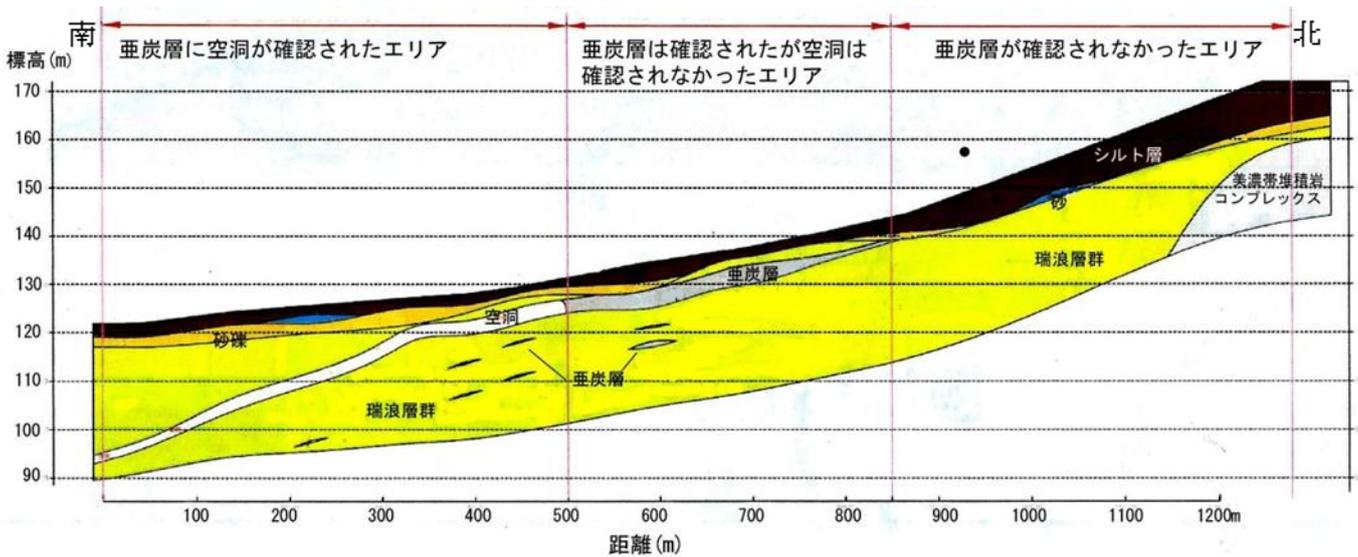


図 31 県道多治見白川線大庭交差点より北に延びる方向の地質断面図、図 29 参照)
(出典：飛島・栗山特定建設共同体資料)

この図で“垂炭層に空洞が確認されたエリア”を中心とした 670m の区間が充填工事区間で、その区間の一部の坑内状況が 360° の全景写真として示されている(写真 35)。



35 垂炭廃鉱内部の様子，矢印は地下水面
(出典：飛島・栗山特定建設共同体資料)

写真から支柱として掘り残された亜炭層と地下水面の状況がよく観察される。当然のことながら亜炭鉋稼働時にはこの地下水面を下げている訳であるから、常時相当量の地下水が汲み出されていたことがわかる。またこのような地下空洞を充填する作業、経費が膨大な規模になることは、素人の筆者にも容易に理解できる。参考までに工事の様子を以下に添えておく

(図 32、写真 36, 37)。

キラと称する充填材の材料は砕石の洗浄時にでる細粒土(粘土キラ)を利用し、これにほぼ同量の現地産の砂質土(砂キラ)を混合させてスラリーとしている。

充填に際して懸念される地下水への影響や地盤変位については細心の注意が払われているのは言うまでもない。

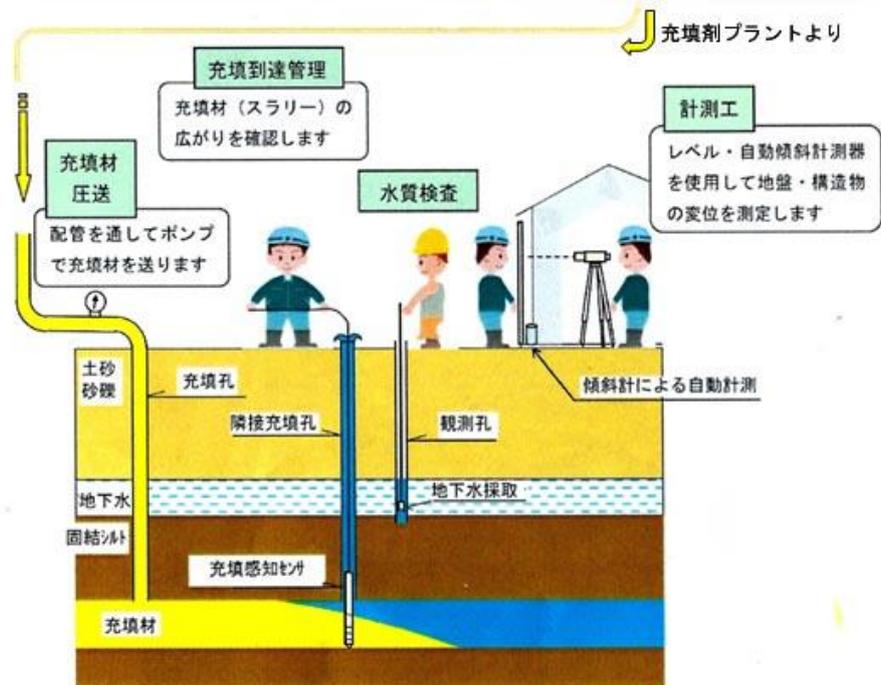


図 32 充填工事の概要

(出典：飛鳥・栗山特定建設共同体資料)



写真 36 粘土キラ (左) と砂キラ (右)



写真 37 充填材製造プラント
(手前セメントサイロ、前方充填材製造装置)

(6) 栃木県大谷石採掘地域のシンクホール

石材として有名な大谷石は栃木県宇都宮市の中心部から西北西 7.5km ほどのところ
にあって、南北に細長く続く中新世の岩体の一部である。これは海底火山活動に伴って
形成されたもので、岩石名は流紋岩質溶結凝灰岩である。その深さは地下数百に達する
といわれている。

江戸時代に遡る長期間の採掘が続いて原地形は大きく改変されているが、図 33 に示
した立体斜度図^{脚注)}によって、この地域の地形の特徴をよく把握することができる。

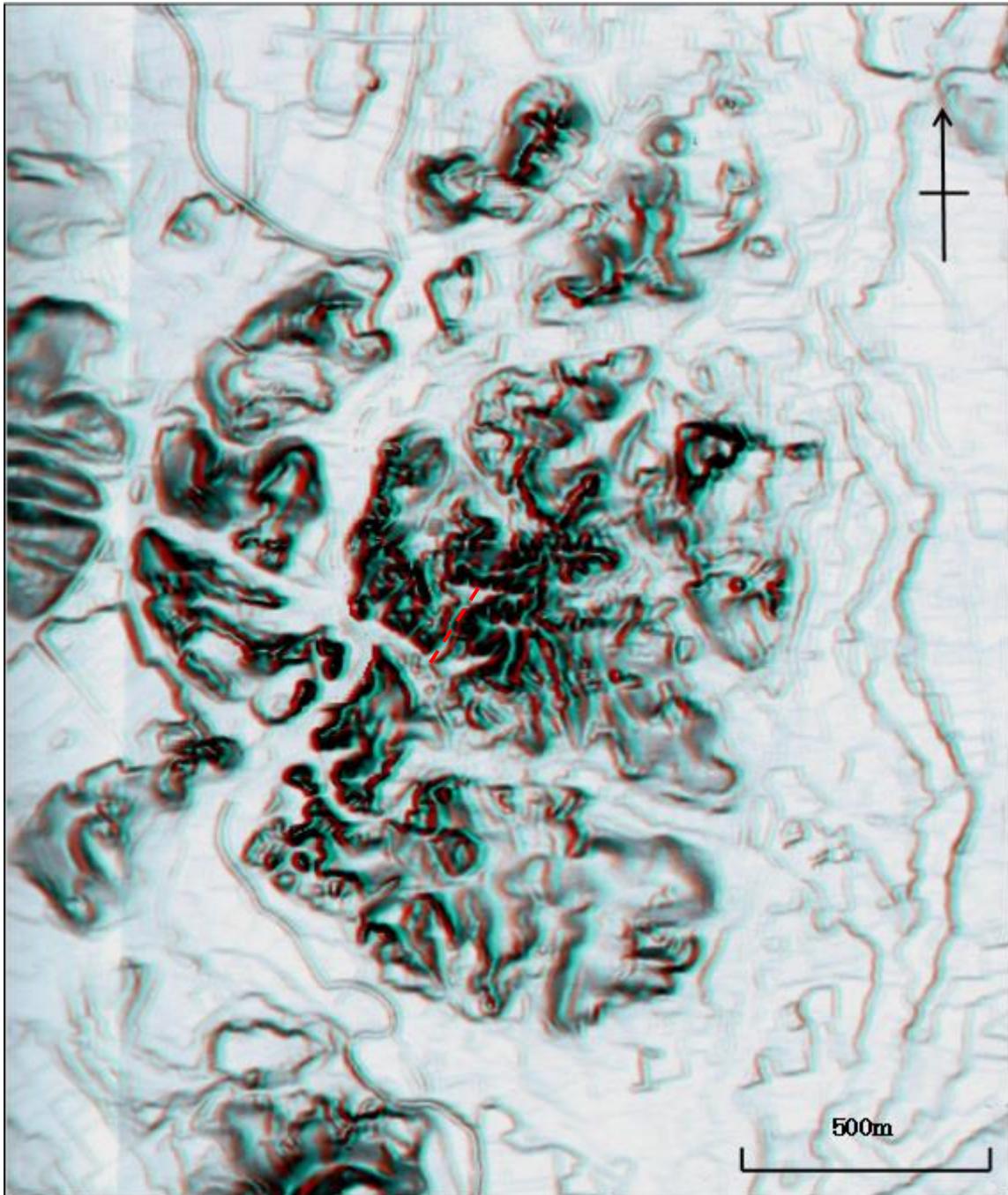


図 33 大谷地域の立体斜度図 (図の中央部に大谷石資料館が立地、西側を南北に切る谷は姿川)

脚注：(株)横山空間情報研究所作成 (5m メッシュ DEM 使用)、赤青メガネ  で立体視可能

そのきわ立った特徴は、図 34 の東西断面に見るように、姿川方向の西側斜面と宇都宮市街地方方向の東側斜面が非対称的であるという点である。なお図中の斜線はこの地域の地層の傾斜の大勢（東傾斜 10 度前後）をイメージとして画いたもので正確なものではない。

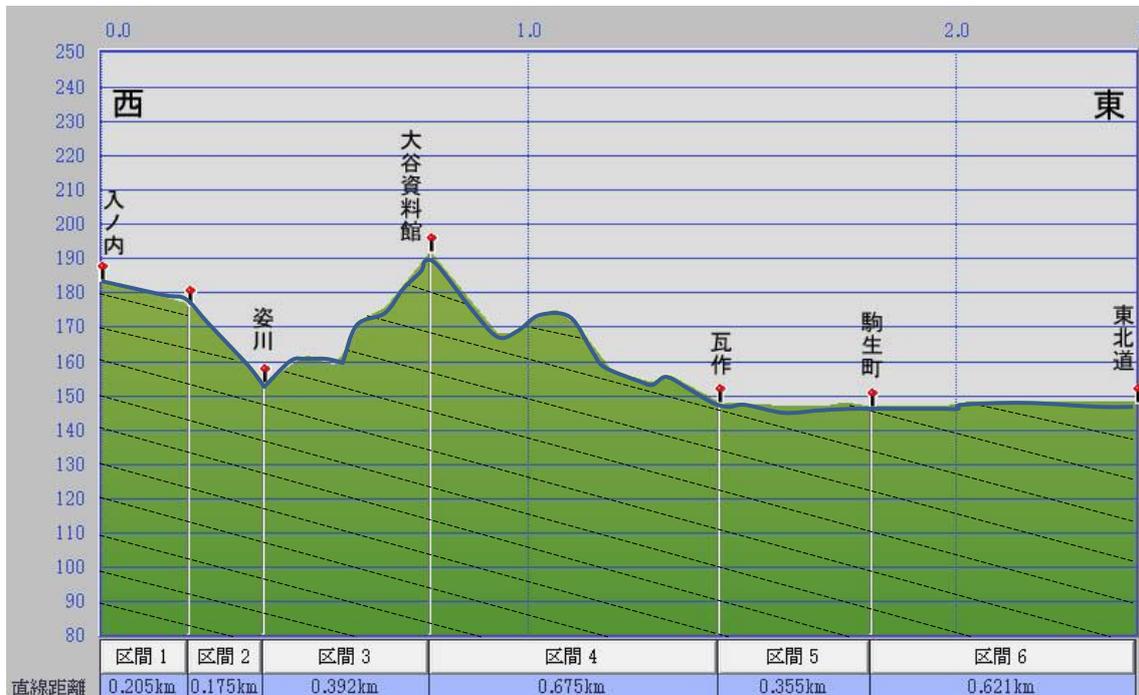


図 34 大谷資料館を中心とした東西地形断面
(カシミールを使用して作成)

もう一つの特徴は図 33 の立体視によって画いた図 35 の谷系図によく示されている。すなわち、

- ① 全体として谷の傾斜は姿川方面が東側に比べて急である。
- ② 明らかに河川争奪によるものと思われる地形（図中○印）が存在し、いずれも姿川側に流れる谷の方が優勢である。

これらの特徴は大谷石地域が東へ傾動する地殻変動の場にあることを示唆するものといえる。一方、大谷石の断裂系について、安藤 武，岡 重文 (1967)は、

- ① 断裂系の大部分は張力性の割目として発達しており、せん断性の割目はきわめて少ない。
 - ② NW-SE 系と NE-SW 系の 2 大断裂系が分布しているが、NW-SE 系の断裂が優勢である。
- としている。

以上の諸点は当地域の陥没現象の素誘因として重要な地下水の存在を規定する要因となっている。しかし地下水に関して入手可能な情報は公益財団法人大谷地域整備公社が公開している「大谷石採取場跡地観測システム」による限られた地点の水位記録^{脚注)}

脚注：地下水位の情報は井戸 1 ヶ所、採掘跡の空洞 5 ヶ所に限られる

以外には無く、その他は間接的かつ断片的な情報から類推する外はない。以下はそれらの集約である。

- ① 横山幸満他(1997)によれば、現位置の地下水位は地表面下数メートルにあるとしている。
- ② 新聞等で報じられた陥没の予兆には井戸枯れに関するものが目立ち、また陥没によって水路が絶たれ、田植えができないといった記事もみられる。
- ③ 「大谷石採取場跡地観測システム」で報じられている地下水位記録によれば、観測の対象としている大谷石採掘跡の空洞に設置した水位計の降雨応答は図 36 のように一か所を除いて明瞭で素早い。また地下水面の標高は、通常は 142m 付近にあり、よく揃っている。

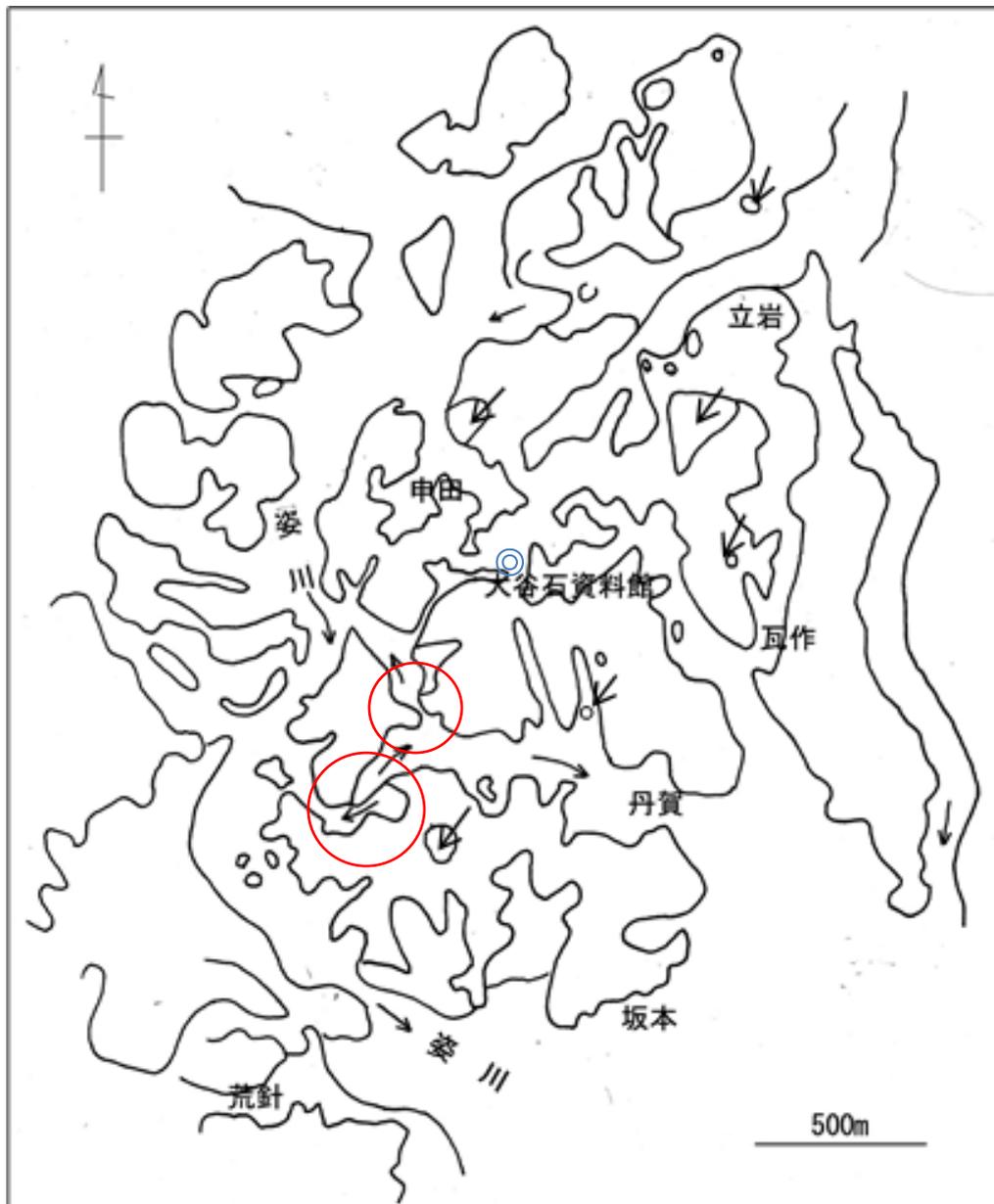


図 35 立体斜度図から画いた谷系図
(図中○印は河川争奪が認められる箇所)

以上の事実はこの地域の地下水が不圧性であることや、大谷石に発達する裂隙(断裂)によって岩体全体としての透水性が一層高くなっていることを示している^{脚注 1)}。

なお空洞の天端上位の地中水はそのエリアに限定されて宙水化している可能性がある^{脚注 2)}。これは降雨時の空洞水位の上昇が急激に行われる現象を説明する機構として重要であり、同時に空洞陥没の危険性評価の際の手掛かりとなる可能性がある。

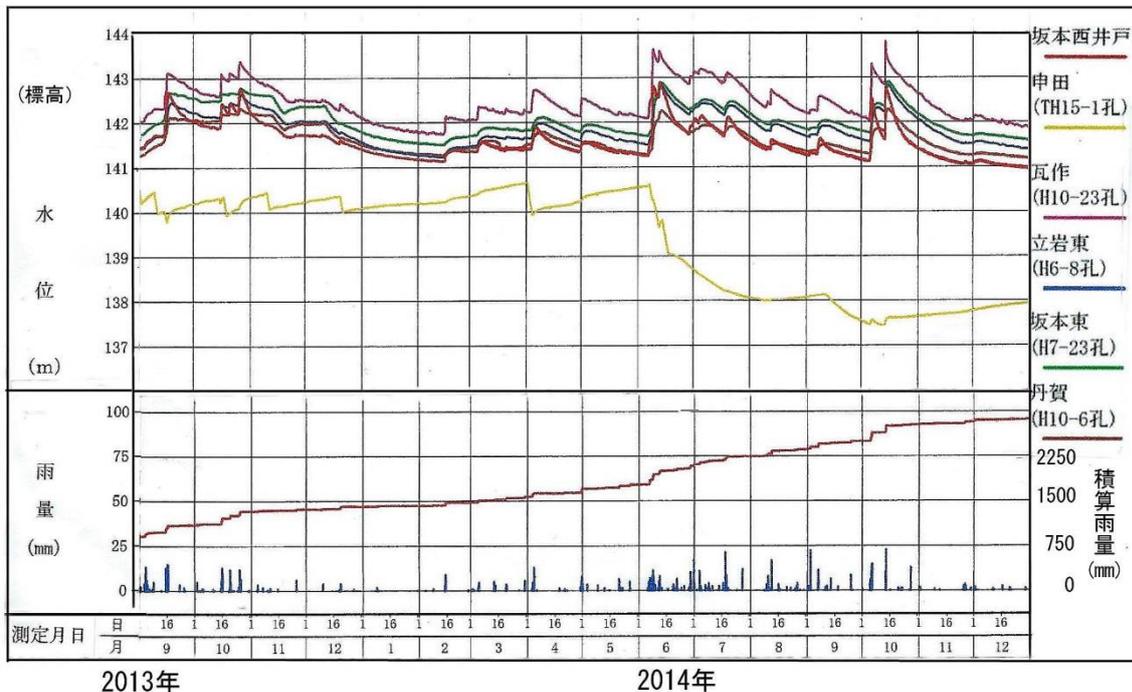


図 36 地下水位変動記録 (原図の一部を抜粋)

(出典：公益財団法人大谷地域整備公社 HP)

筆者がもう一つ注目している現象は大谷石における風化劣化と沸石脈^{脚注 3)} の関係である。岩層の劣化に関わる沸石の存在に関しては、以下のようにこれまでも幾つかの指摘がなされている。例えば、

- ① 大谷地域における大部分の断裂系は、幅数 mm ないし、数 cm の割目粘土を挟み、この外側に幅数 cm ないし数 m の変質岩を伴っている。かつ 70~90° の立つた長い断裂として存在する。なお断裂系の割目粘土はほとんど Clinoptilolite (斜プチロール沸石) からなる (安藤 武, 岡 重文 ; 1967)。
- ② 大谷石地下採掘場において検証した大谷石の長期的な変化による風化では、Gypsum の析出と Clinoptilolite や Quartz の減少などの成分の変化や、それらを原因とする強度の変化が起こると考えられる (菊池健太他 ; 2010)。
- ③ 岩盤中の沸石脈は、地下水位以下では安定を保つものの、地下水位より上の部分では乾湿繰り返しにより結晶水が次第に抜けて結晶構造が崩れていき、脈沿いに空隙が生じやすくなる性質を有している (二木 重博他 ; 2009)。

脚注 1：有効空隙率は 30%以上と極めて高い。

脚注 2：八幡敏雄 (1975) による上座毛管水。これは毛管力と重力との釣り合いによって保持されている地中水である。

脚注 3：この地域の沸石は斜プチロール沸石(Clinoptilolite)が主体と考えられる。

- ④ 沸石脈の生成に伴う変質は深層風化の原因の一つにも考えられる風化の実態に迫る重要な問題の一つである（三浦 清；1988）。
- ⑤ また大谷石の劣化について、「…大谷石の表面が段々と剥がれだし、ひび割れを起こしながらボロボロと表面がかけ落ちている事が良く見られる…」（大谷石施工業者）といった指摘も注目すべき現象である。

これらのことに関して筆者は興味ある現象を観察することができたので紹介しておく。写真 38 の中央部は大谷資料館の地下空洞の壁面にみる“ミソ”と称する暗緑色～暗黒色の内包物が抜けてできた紡錘状の隙間やその周辺に晶出した Clinoptilolite の結晶で、俗に“石の華”と呼ばれている。

ここで、地下水と沸石の関係について以下にまとめておく。

- ① 大谷地域の地下水は既述のように多くは不圧状態にあり、地下水位は浅いところでは地表から 10m 以内の場合が多い。
- ② 掘削壁面にはその地下水の漏出面（Seepage face）とみられるゾーンに斜プチロル沸石の集積が地下水面と平行に複数層に発達しているのが見られる（写真 39, 40）。
- ③ また空洞内の積み石の裏側など、地中水が溜まりやすいところにも沸石の晶出が見られる（41, 42）。
- ④ これらの集積は乾燥期には消失し、湿潤期に出現する。この繰り返しによって、掘削壁面の風化が進行し、やがて風化部は剥離して落下する。
- ⑤ 地中水の浸透経路となる空洞内の残柱部分ではこの過程が他より進みやすく、強度低下が著しくなるものと考えられる。

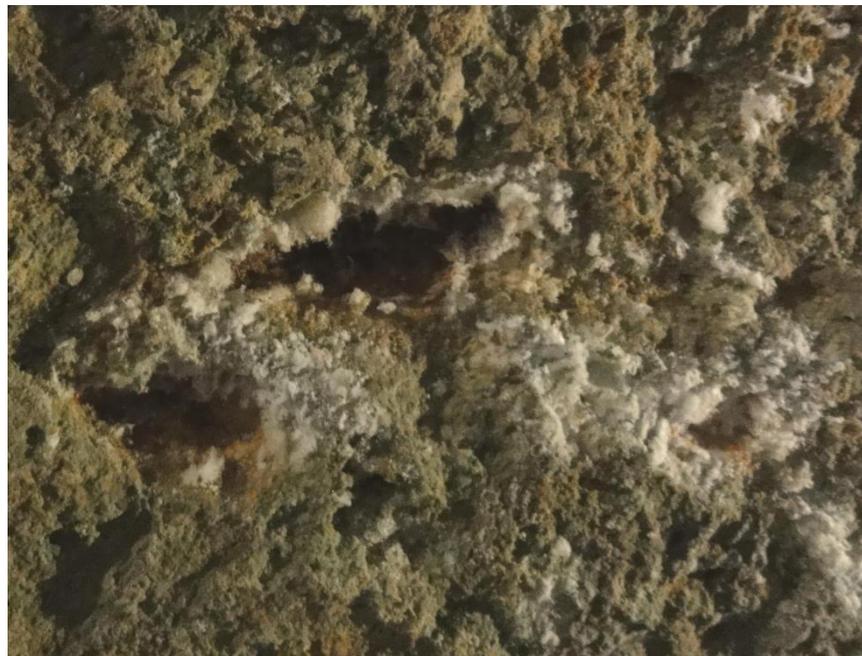


写真 38 地下空洞壁面に晶出した斜プチロル沸石
（白色毛状の結晶）



写真 39 大谷石採掘跡の洞窟地下水

位置は大谷石資料館の北側にあたる。“地底湖クルージング”の場所として楽しまれている。



写真 40 同上の近接
〔 沸石の晶出位置は地下水面の位置と関係 〕
〔 図中の矢印は地下水面 〕



写真 空洞内の積み石の隙間に集積した沸石



写真 42 同上の近接



ここで本題の最初に紹介したアメリカ アラバマ州の石灰岩採掘に伴うシンクホールの話に戻る。この場合は採掘対象は石灰岩なので大谷地域とは異なるが、地下水位の低下がもたらす現象は同じである。

アラバマ州では陥没の発生の予兆を把握する手段として、リモートセンシング技術が採用されていたが。その手がかりとしているのは地下排水系の変化によって生じる植物活性への影響である。赤外線撮影はその一つで、写真 43, 44 は地下排水系の変化がもたらした植物活性の変化、またリニアメントやシンクホールの位置調査の例である。筆



者は大谷石地区でも最近発達してきたラジコンヘリによる空撮技術の適用が可能ではないかと考えている。

本稿を草するに当たり、岐阜県御嵩町亜炭鉱廃坑対策室及び飛島・栗山共同企業体の関係者から現場案内、資料提供を頂いた。また川崎地質株式会社の中田文雄氏からは種々ご教示、ご案内を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。



写真 43 植生ストレスと地下排水に起因する表層沈下

〔出典：Geological survey of Alabama(1973):Sinkhole problem along proposed route of intetstate highway 459 near Greenwood,Alabama.〕

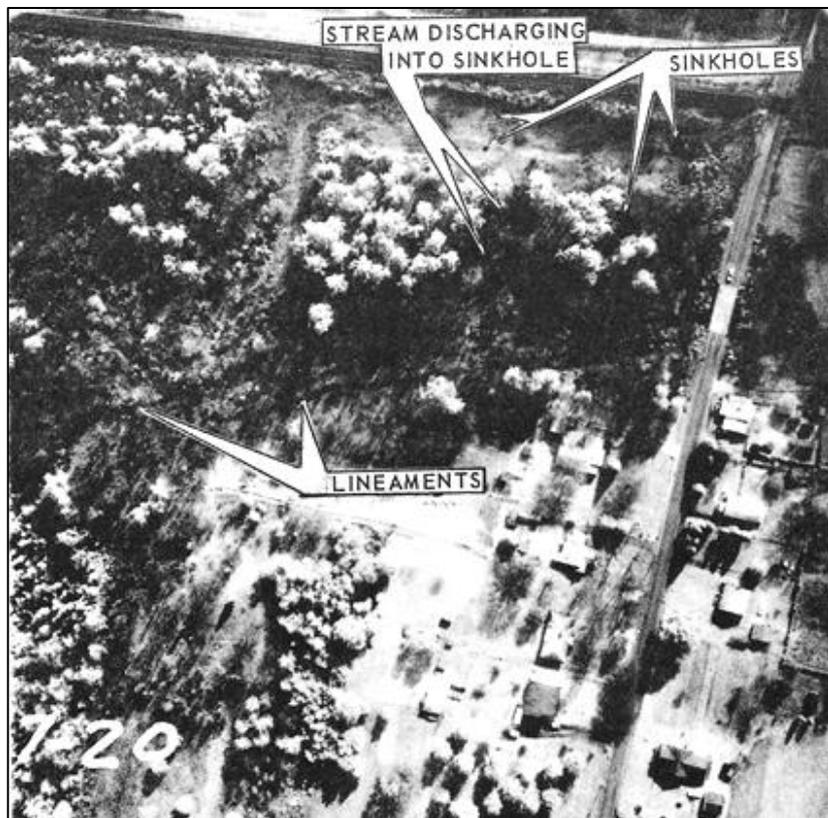


写真 44 リニアメント、乾燥化、シンクホールの赤外線写真

〔出典：Geological survey of Alabama(1973):Sinkhole problem along proposed route of intetstate highway 459 near Greenwood,Alabama.〕