

50. シンクホールと地下水

(1) はじめに

筆者は陥没孔、つまりシンクホールについて真っ向から取り組んだことはない。しかしこのシリーズでも以前取り上げたソイルパイプを“地下浸食”と言う面からみると両者はかなり関連の深い現象と言える。実際降雨時のパイプ流とともに吐き出される濁質や溶質の量は長年月のうちには相当な量に達し、これが地表の陥没につながることはしばしば目にするのである。

写真 1、2 は多摩丘陵の斜面末端部によく見る陥没孔で直径、深さともに 2m 以上に達し、山仕事に入った人がこれに落ちて大怪我をすることがあって、恐れられている。

陥没にはこのように自然にできるものの他に、鉱山、地下構造物、上下水道管、基礎工事、石材採掘など人為的な要因に伴って発生するものも多く、時折ニュースになることがある。もちろんすべてではないが、地中の水が直接、或いは間接的にこれに関与しているケースは多い。

さて筆者はかつてアメリカ合衆国アラバマ州のモンゴメリー市にある USGS（アメリカ地質調査所）を訪問し、シンクホールの研究で著名な J.G.Newton 氏の案内をいただいて、この付近の陥没現場を見学する機会に恵まれたことがある。その詳細は次節で述べるが、その折、氏から『シンクホールは人為の有無によって大きく“induced”と“natural”に分けることができる。さらに前者は地下水の排除による水位低下が引き金になるものと、建設行為そのも



写真 1 斜面末端部にできる陥没孔
(竹の枝で覆ってその所在を示している)



写真 2 陥没孔の孔底
(水路になっていて水が流れている。⇒印)

のが直接引き金になったものに分けることができる。しかし炭酸塩岩が地下に広く分布するこの地域ではどちらにもカルスト性の空洞（図 2 の air-filled opening）の存在が大きく関係している』との説明を頂いた。話はまずそこからスタートすることにする。

(2) アメリカアラバマ州のシンクホール
上に述べた“induced” type のシンクホールはアラバマ州だけで 4,000 箇所以上を数え、1900 年頃から多発するようになった。それらの殆どは上記の空洞の開口部を覆う残積土などの未固結層下底部の”抜け落ち”をトリガーとしたものである。

陥没は何の前触れもなく突発的に起るので、人畜に被害が及ぶことも多い。したがってできるだけ早く予兆を把握し、危険を予告するのが USGS の仕事となっている。筆者もこれに同行したが、あまり好い気分ではない。案内者は数日前に付近で陥没孔に車ごと飲み込まれた事故があったと話していた。

予兆調査は写真 3 のように踏査によってなされているが、その前に航空機による視察、リモートセンシングによる調査（植生活性、植生ストレスなど）が行われていた。

現在では詳細な DEM 情報が活用されていることであろう。

陥没は写真 4 くらいなら根系によって地

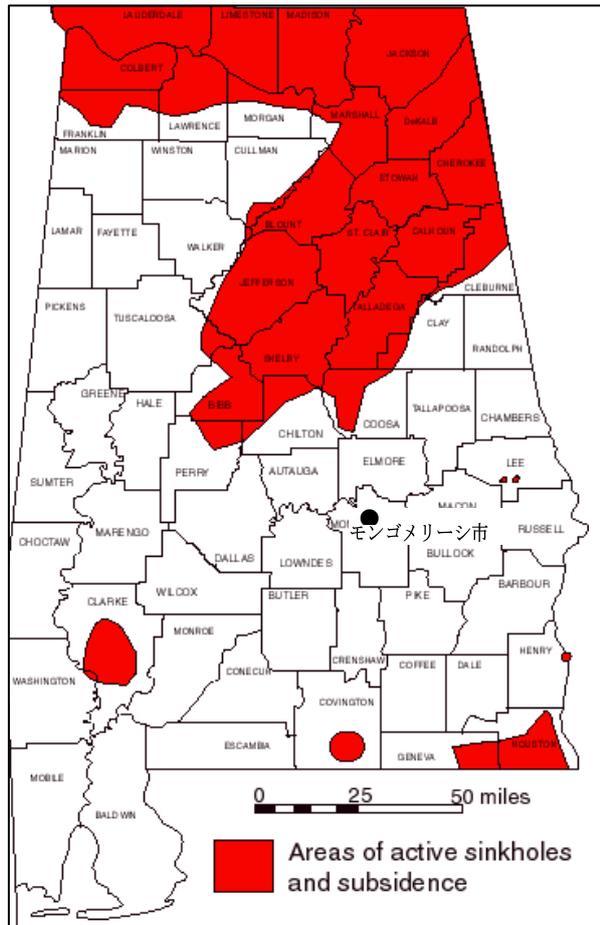


図 1 アラバマ州におけるシンクホール、地盤沈下地帯



写真 3 陥没の予兆を指さす案内者
(前方 USGS アラバマ支所の J.G. Newton 氏)

盤が支えられているので心配ないと、案内者は話していたが、気のせいか歩くたびに地盤が揺れている感じがした。

さてこのような現象をもたらしている犯人は写真 5 にみえる石灰岩鉱山である。アラバマ州には石灰岩が広く分布し、坑道掘削や露天掘りが各所で行われており、その鉱内水の排除のために大量の地下水が汲み出されている(写真 6)。

陥没がまさに発生したばかりの現場まで案内して頂いた。写真 7 がそれで、深さ 20m は優にある。上部 2m ほどがラテライト質の残積土でそれ以深は石灰岩の岩屑を含んだ残積土となっている。図 2 は Newton 氏による地質・地下水とシンクホールの関係を示した模式図であるが、陥没は石灰岩洞と残積土層の接触部に発達した上述の空洞の拡大が直接原因で、その過程で地下水の挙動が引き金となっていることが示されている。

地下水位は石灰岩と残積土層の境界部付近を中心に上下し、時にはその部分から写真 8 のように地下水が流れ出していて、大きな空洞が存在していることを示している(矢印)。このような空洞が大雨の度に拡大し、陥没につながることは容易に推察できる。



写真 4 陥没の予兆

〔この段階で地下には大きな空洞ができているが根系が地盤を支えているので近寄っても大丈夫だと案内者の言。しかし恐る恐る撮影〕



写真 5 遠方の石灰岩採掘現場と手前の陥没孔



写真 6 鉱内水の排水

このような現象について、筆者は以前から“地下浸食”という語を与えているが、ここでも“Subsurface mechanical erosion”、“あるいは“Erosion from below”という、まさにこの現象に対して適切な語でその特徴を表現している。

このようにして地下の空洞と繋がった陥没孔からは大雨時にさらに大量の水が吸い込まれるようにして流れ込み、孔は拡大する。残積土層に形成されたこの空洞は成長を続け、シンクホールのトリガーとなる。

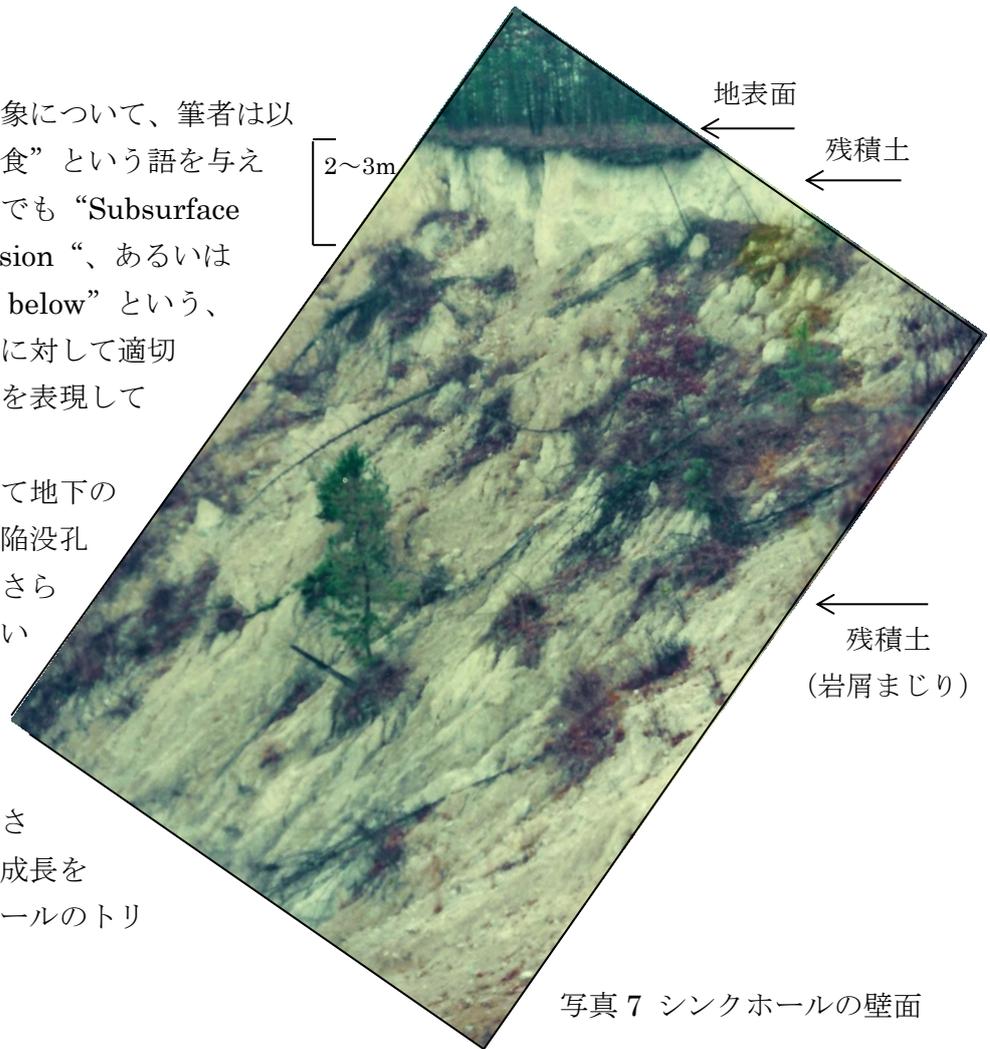


写真7 シンクホールの壁面

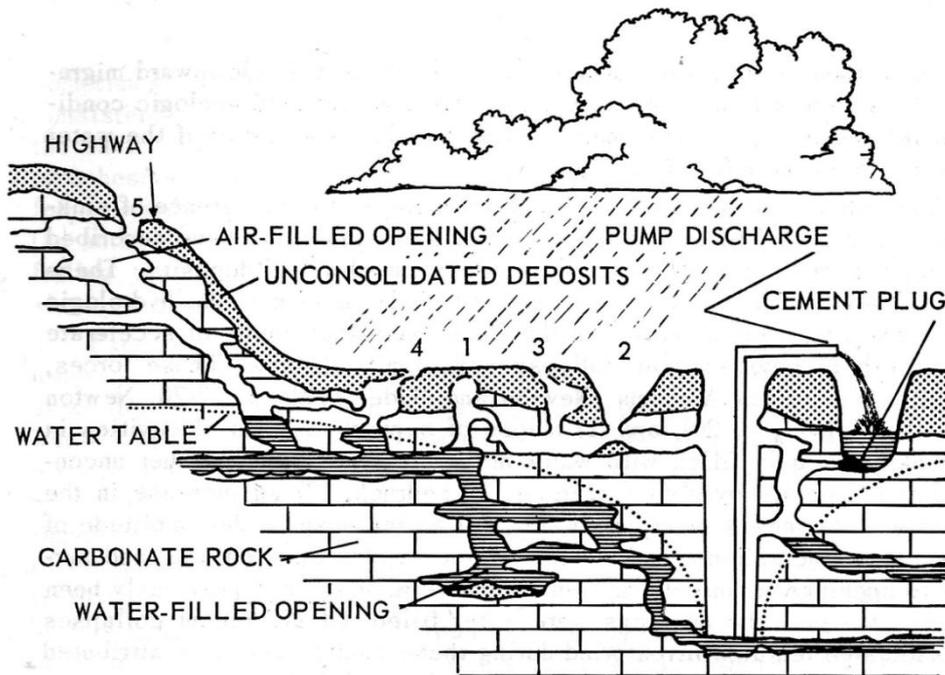


図2 地下坑道からの地下水排水と陥没発生状況の模式図

[出典 : J.G. Newton(1976):Early detection and correction of sinkhole problems in Alabama, with a preliminary evaluation of remote sensing applications, U.S Geological Survey.]

地下水面は図 3 にみるように 10m 以上の幅をもって変動していて残積土層中の水分は乾燥と湿潤を繰り返すかたちになっている。こうしたプロセスは地層の劣化を増進させ、空洞の拡張に大きく寄与しているものと思われる。

石灰岩の採掘によって引き起こされたシンクホールの位置が、その周辺へ広がっていった記録が残されている。写真 9、10、及び図 4 がそれで、場所はバーミンガムの南約 26 km のペラム (Pelham) という町である。

石灰岩が採掘され始めたのは 1950 年以前と大変古いものであり、露天掘りの規模も小さかったので、写真 9 のように目立った被害は生じていない。しかし 1967 年の写真 10 によると掘削規模は拡大し、無数の陥没が採掘場を取り巻くようにして発生している。それ以降の様子は図 4 のようで、掘削エリアはさらに拡大し、被害範囲も 500m 以上に広がっている。

この現場が 1967 年 10 月に廃坑になると同時に、地下水位は回復し、陥没現象も終息した。以上の経過と現象は地下水の動態が如何に強力に地盤の安定に関わっているかを示す好例と言えよう。

Google earth から得た画像

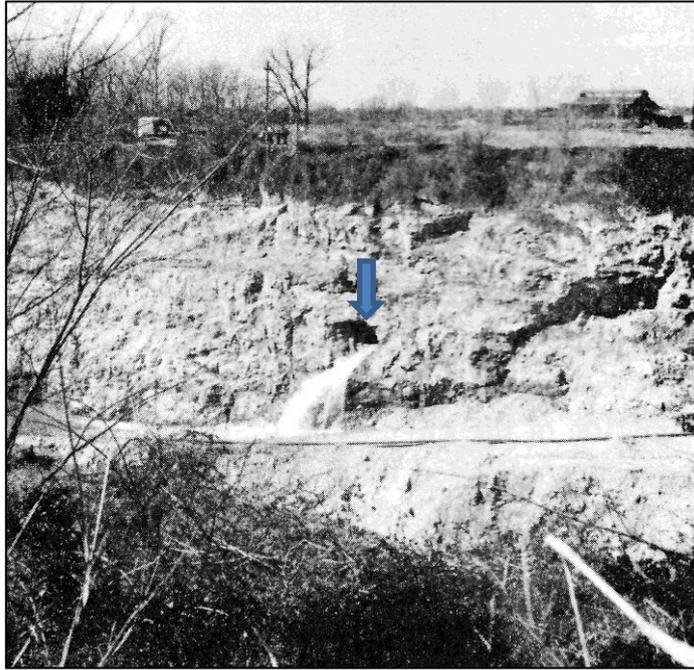


写真 8 残積土層中の巨大パイプ
(大降雨時にパイプ流が発生、出典：図 2 に同じ)

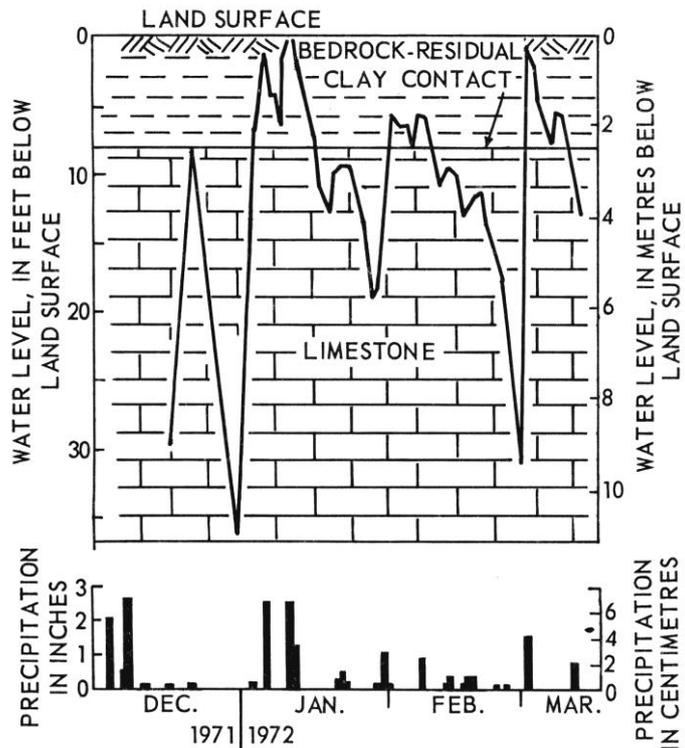


図 3 基盤の石灰岩と残積土層に跨る地下水の変動
(バーミンガムの南西 20 km 地点、ベッセマー)

によると、写真 11 のように、かつての被害地には住宅地や工場群が立ち並び、石灰岩の採掘跡地は親水公園になっている。まさに隔世の感である。

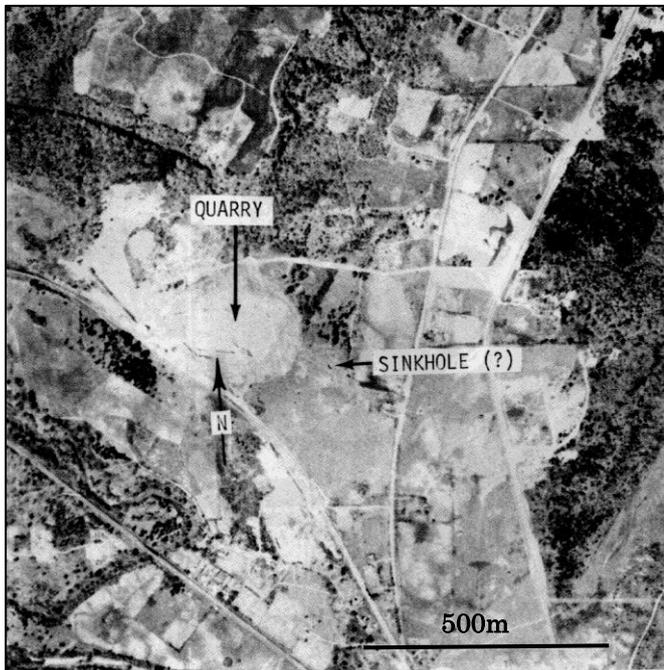


写真 9 1950 年、石灰岩採掘初期

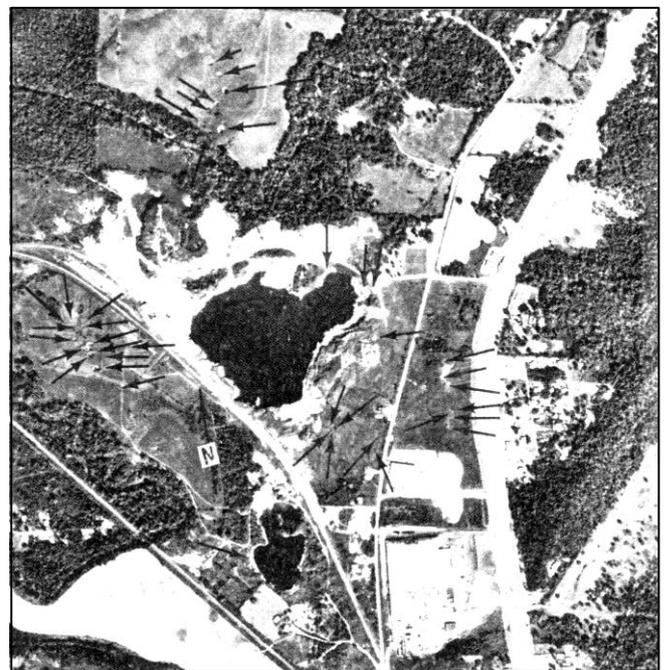


写真 10 1967 年、シンクホール多発 (矢印)

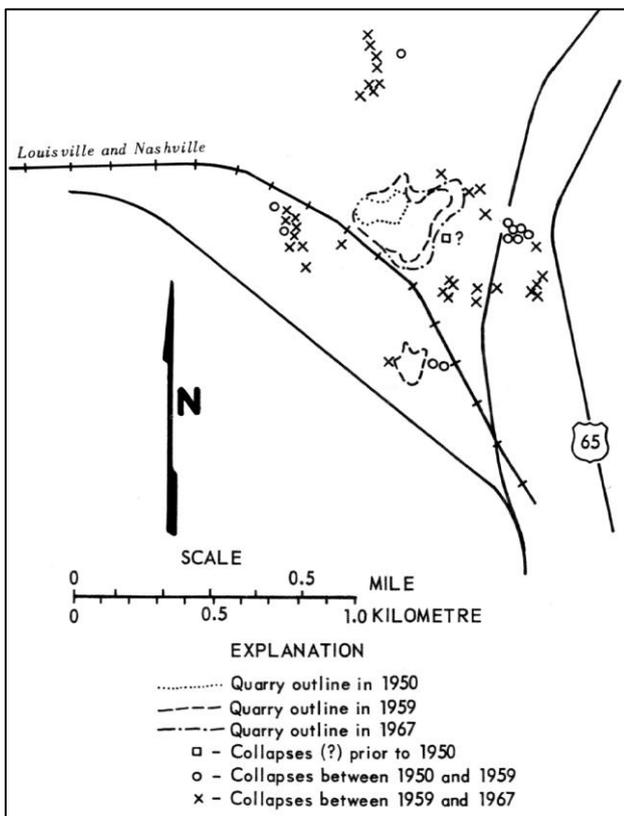


図 4 シンクホール被害の拡大状況



写真 11 最近の状況

かつての被害地は宅地化し、工場が立ち並ぶ。また採掘跡地は親水公園になっている。

(2) 死海沿岸のシンクホール

以前このシリーズで「聖書の中の水」と題した話題を紹介したことがある。「十戒」のモーゼがイスラエルの民を引き連れてエジプトを脱出し、苦労を重ねたのち、たどり着いた“神との約束の地”カナンにいたるまでに遭遇した水にまつわる出来事の言い伝えを題材としたものである。カナン、あるいはカナアン（英語では Canaan）は地中海とヨルダン川・死海に挟まれた地域一帯の古代の地名で、現代のイスラエルと重なる。

聖書では「乳と蜜の流れる場所」と描写されているが、筆者は、これは“豊かでおいしい水”のことを指しているように思えてならない。ここでイスラエルの民は、ようやく安住できることになるが、それには水の恩恵を得ることができたところが大きい。

ところでこのような比較的自然に恵まれた地域、とくに死海の沿岸地域で最近地盤の陥没が多発していることが大きな問題となっている。以下のような表現、すなわちいわく、“Will the Dead Sea be eaten by sinkholes?” また、“Huge chasms are appearing in the region at a rate of one day” が事実なら大変な問題で、このことについて以下に考えてみることにした。しかし筆者はこの地域に関しては、かつて JICA が主宰し、地質調査所が実施した「Training course in groundwater resources development」の講師を 10 年近く務めさせていただいたとき、受講生が提出した「Country report by participant of group training course in groundwater resources development」の情報のほか、中東地域出身の留学生から得た情報、そして文献やウェブサイトの情報以外には有していないので詳しい話ができないのをご容赦願いたい。

さて死海沿岸にシンクホール被害が注目され出したのは 1970 年代のことで、イスラエル側の Ein Gedi というところで発生したのが切っ掛けだと言われている（写真 12）。そして 1990 年代になると、この現象は北に拡がり、また南に拡がって行っている。その分布は死海の方角、すなわち “Dead Sea Transform rift valley” と呼ばれる地質学的な構造に沿っている。

過去数年間の傾向をみると、シンクホールは年間 150 から 200 か所で発生している。またこれは年を追って増加し、現在では 1 日一カ所のペースで、この地域のどこかで、また人の目につかないかたちで進行しているのではないかとの指摘もある。まさにこのままゆくと “死海はいつかはかはシ



写真 12 死海南部 Ein Gedi におけるシンクホール
 出典：Laurie Balbo (2013):Mysterious Sinkholes Threaten to Sink the Dead Sea

ンクホールに飲み込まれてしまうのではないか”との杞憂にも真実味が出てくる。実際、死海の水位は年間 1m というペースで低下し続けているのが現状で、その軌跡は写真 13 のように湖岸線に沿って残されており、また写真 14 のような標識も建てられている。

これらの現象とシンクホールの発生は写真 15 のように密接のように見えることから上述のような表現になっているのかも知れない。



写真 13 湖岸線の後退の様子
(出典：Google Earth)



写真 14 2000 年時の死海の位置
(出典：Google Earth)



写真 15 湖岸線に沿って並ぶシンクホール
(出典：Google Earth)

ところで死海に流れ込むヨルダン川の流量の大半は上流域のダム群—その殆どはヨルダンとイスラエルのものである—によってカットされていることが、死海の水位低下につながっている訳であるが、その水位低下がシンクホールの発生に関わっているという大方の見解の通りだとすれば、どのような要因が関係し、またどのような

プロセスで進行しているのでしょうか？

これについての詳細な検討はしばらく後にまわすこととし、もう少しシンクホールに関連する現象を整理しておくことにする。

- ① シンクホールの大きさは様々であるが、多くは直径、深さともに 20～25m 程度である。またその数はイスラエルの地質学者 Eli Raz (1999) ^{脚注} によるとイスラエル側の死海沿岸だけで 3,000 カ所に達するという。
- ② シンクホールの崩落崖にみる露頭から、死海沿岸地域の地層は一般に礫・砂・泥を

脚注：調査中シンクホールに落ちて閉じ込められたが、必死に這い上がって九死に一生を得た人として有名なイスラエルの研究者

混えた雑多なものであるが（写真16）、場所によっては岩塩をはじめ、泥灰質の蒸発岩が混在するところもあり（写真17）、南部死海には岩塩や泥灰岩の採掘地が存在する。

- ③ シンクホールは死海沿岸の低地に発生するものばかりではなく、それに似た地形は後述のように湖岸から離れた南部死海西岸のセドム（Sedom）山（写真18）やその対岸の Lisan 半島（写真19）でも認めることができる。

死海沿岸のシンクホールの発生には上述のようにヨルダン川の流量減少をもたらした上流域の水利用の増大という人為的な要因が大きく関わっているという指摘は多い。すなわち流量の減少によって生じた地下水位の低下によって誘発された浅い新鮮な地下水や灌漑水の浸透によって地層中の岩塩が溶かされ、これによって生じた空間がシンクホールに繋がったとされている。しかし筆者はこのよ

うな単純なものではなく、時空間的にみてもっと規模の大きな地質学的背景を考える必要があるとみている。

ここで死海を離れて周辺の高地に目を移そう。上述の Sedom 山は Salt dome、或いは Salt diapir^{脚注}として知られ

ていて“岩塩カルスト（salt karst）”が各所でみられ、観光地として訪ねる人が多い。また対岸のヨルダン側の高地にもソルトドームとみられる地形が各所にあり、また明らかにシンクホールと思われる地形も Google Earth 上で特定することができる（写真20）。



写真16 シンクホールの地質
（出典：Google Earth）



写真17 死海南部西岸の Ein Gedi における
岩塩とシンクホールのセット
（出典：Google Earth）



写真18 北西から望んだ Sedom 山（出典：Google Earth）

脚注：閉塞された海域に堆積・濃縮した塩が上載堆積物の荷重により塑性体となり、これは周辺の岩層より比重が小さいので、塑性流動を生じて浮上する傾向を示す。その過程で柱状やドーム状となり、遂には地表に露出するに至る。この一連の現象をダイアビルと称する。この場合は地質が岩塩なのでソルトダイアビルという。またここで侵食に曝されると独特な地形、つまりソルトカルストがつくられる。



写真 19 現在のヨルダン溪谷盆地

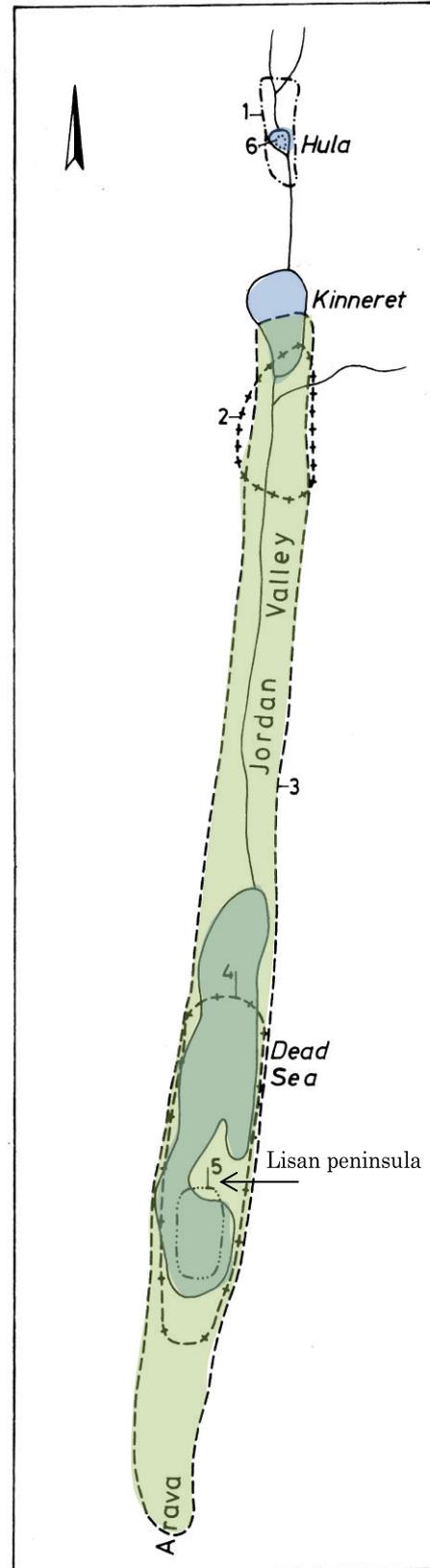


図 5 更新世におけるヨルダン溪谷の湖沼群
(濃色部は現在、淡色部は最大期の Lisan Lake)
出典：Aharon Horowitz (1979):
The quaternary of Israel

ここで写真 19 に添えた図 5 を見ていただきたい。これは更新世におけるヨルダン溪谷の湖沼群の消長を示したものである。特に目を惹くのは 70,000BC から 12,000BC に存在したとされる Lisan 湖の規模で、総延長は南北に 200 km、幅は東西に 17 km に及んでいる。その水面標高は最高時の 24,000~26,000BC では現在のそれより 200m は高かっただろうと推定されている。



写真 20 死海東岸高地ヨルダン側の Al Hasa にみるシンクホール (出典 : Google Earth)

これを埋めている湖沼堆積物は泥灰質岩、岩塩、ローム質土などの多雨期の湖沼堆積物からなり、Lisan series と呼ばれている。この湖面水位は 17,000BC 頃から低下しはじめたが、その速度は極めて速いものであり、14,000BC から 13,000BC のたった 1,000 年の間に海面下 500m に達した。この速い水面低下によって、今日の死海南部沿岸の Ghor 地域に見るような底の平たい谷が形成された。

ところで図 5 の Lisan 半島^{脚注} 地域にも鮮新世にまで遡る厚い岩塩層を主体とするダイアピルが存在し、その頂部はドーム構造をなしている (図 6)。

急激な古死海の水面低下と、岩塩ドームの上昇という、salt tectonics の 2 つの地質学的過程は、問題となっているシンクホール現象のバックグラウンドとして無視し得ないものといえる。

先に述べた Sedom 山地域でも写真 21 にあるように岩塩ドームの上昇

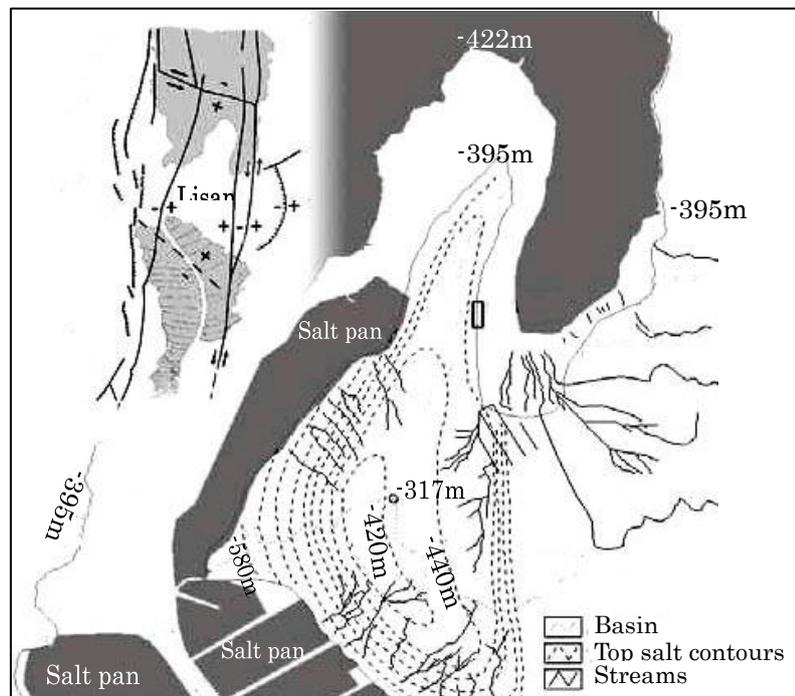


図 6 Lisan diapir 岩塩層頂部の等高線

[出典 : Damien Closson et al.(2001): Salt Tectonics of the Lisan Diapir Revealed by Synthetic Aperture Radar Images]

脚注 : Lisan とはアラビア語で“舌”の意味。写真 19 のように半島のかたちから付けられた名前である

を示す直接的、間接的な地質構造や地形が各所に認められる (写真 22-26)。

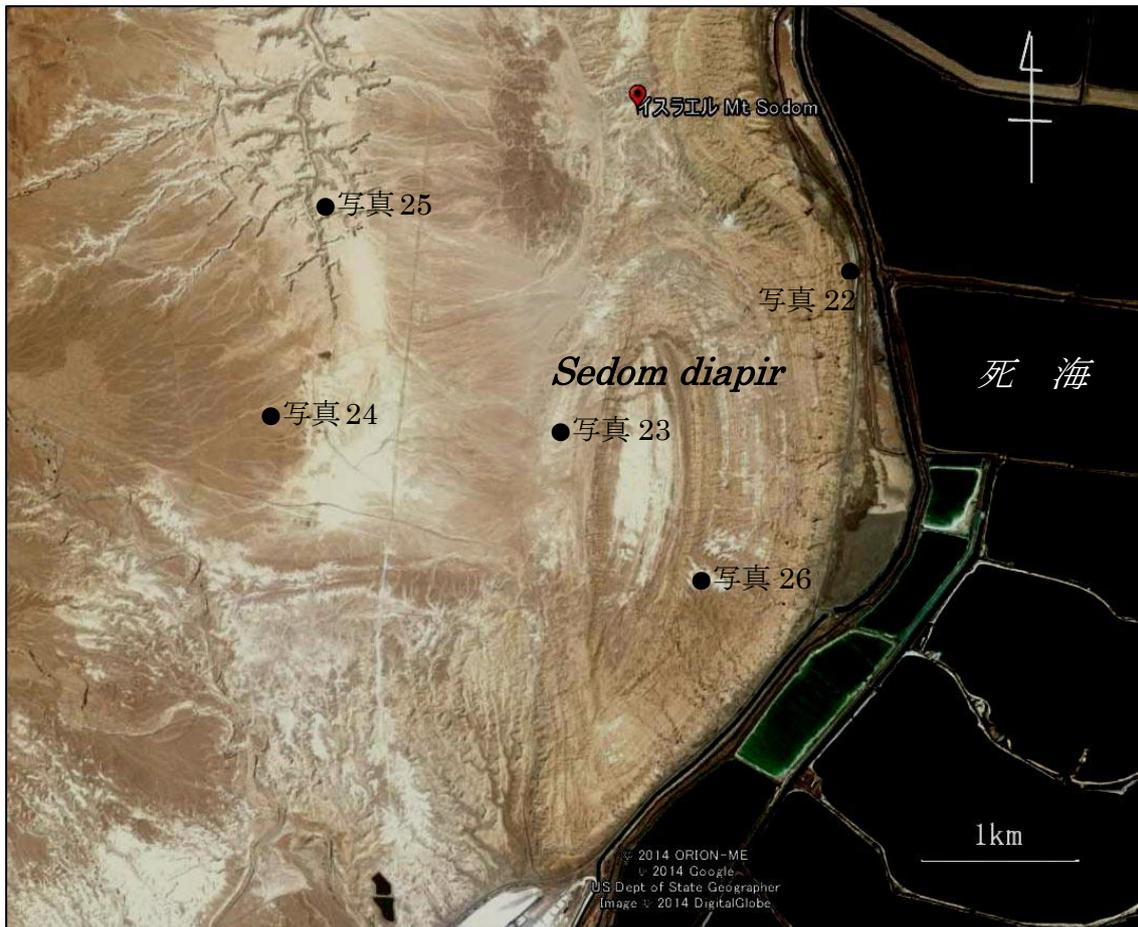


写真 21 南部死海西岸の岩塩ドーム (Sedom diapir)



写真 22 洞穴開口部



写真 23 岩塩の溶解による洞穴

写真 22、23 ともに水に溶けやすい岩塩などが多く含まれる部分が選択的に浸食された結果出来たものと解される。これらはいずれ天井が崩落して、写真 25 のような峡谷をつくる。



写真 24 岩塩層の流動を物語る層相

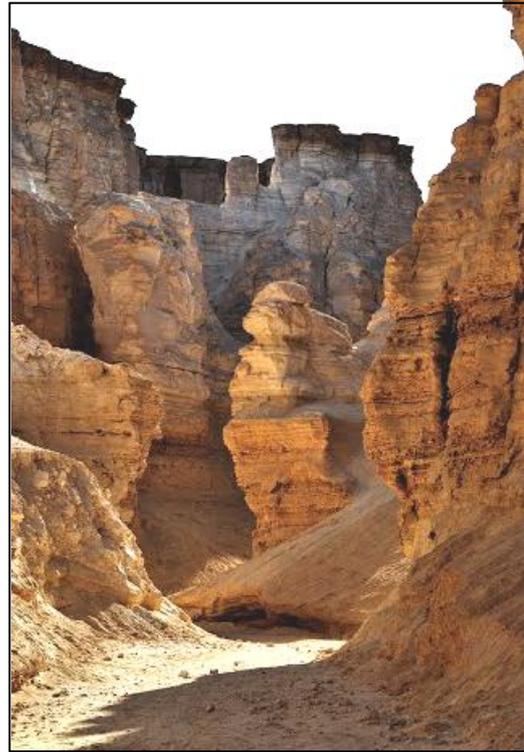


写真 25 ダイアピルの急上昇を物語る深く刻まれた峡谷



写真 26 段丘崖の解体されたシンクホール

写真 22 のような空洞(vadose canyon)の天井が崩落してこのような両岸が切り立った峡谷が形成される。両岸が谷側に向かって湾曲しているのはその空洞の名残である。表層のクラックが入った部分は cap rock で、diapir が地表に露出した際に形成された。

以上の事実を踏まえて言えることは、現在目にするシンクホールなどの現象は永い地質時代を通じて続いてきた地質現象の一コマであるという見方である。すなわち、第三紀のはじめに遡る“Jordan-Dead Sea Transform (JDST)”の活動に尾を引く“Dead Sea pull-apart basin”に堆積した厚さ 10,000m を超す堆積物の存在が背景にあるということである。これらの中に挟在する低比重の岩塩層は鮮新世の厚い堆積物の荷重と共に浮力を得て上昇をはじめ、“Salt diapir”、あるいは“Salt tectonics”として、現在目にするシンクホール現象に引き継がれているという解釈である。

Sedom diapir はその上部を覆う堆積物から、更新世になって上昇を始めたことが分っているが、その上昇量は年間 5 mm と推定されていて、それは最近の衛星データからも裏付けられている^{脚注}。さらにダイアピルの縁部分では逆に沈下の傾向があるとの指摘もある。現在の死海の水位低下はこのような傾向に拍車をかけているということが出来る。

脚注 : R.Weinberger Z.B.Begin et al.(2006):Quaternary rise of the Sedom diapir, Dead Sea basin, Geological Society of America Special Paper 401.