

トンネル工事の知的経験その他

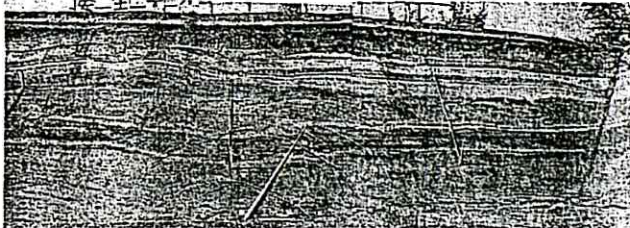
高橋彦治*

1. トンネルのアーチアクションについて

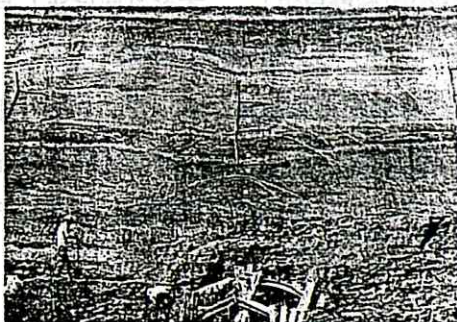
1-1 斜面に記載されたリング状きれつ

次の3枚の写真(写真1)をしばらく観めていただきたい。この写真は宮崎政三氏との共著である「土木地質学」(共立出版、昭和45年)にも紹介されている。東北本線一日市トンネルは昭和43年ごろ、電化計画により改築が行われた。これは、新坑口となったトンネル上部仕切り取り斜面の写真である。そこに、リング状きれつと地層の水平的な落ちこみ(沈下)が明瞭に認められる。その状況は、まさに、さきの村山博士の実験(図-2)で示されたトンネル上部のすべり面と粒状体の運動の状況と軌を一にしている。すなわち、このことはトンネル周辺の地山にグラウンドアーチが実際に形成されている証拠である。そう考えても不思議ではないと思うのである。

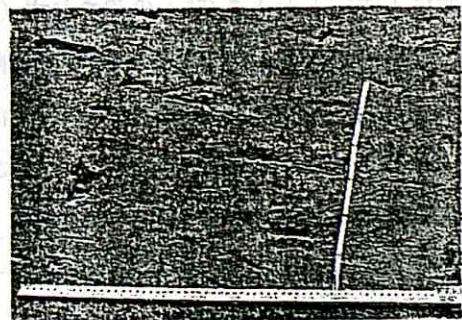
ちなみに掘削によってトンネル上部に発生する地山の沈下曲線のあらわれ方の一般的傾向は図-1のようである。



この写真をしばらくながめていただきたい、トンネルの周辺における地山の変位とアーチアクションの発現についてのヒントを与えてくれる、○明治36年(1903年)に建造された鉄道トンネル、○65年間共用、改築に際して発見されたリング状亀裂、○地質：第4紀泥岩およびローム層(白層は火山灰)。
全 景



トンネルの関係



リング状きれつの状況

写真-1 グラウンドアーチの実際(昭和43年)

* 旭調査設計株式会社 顧問

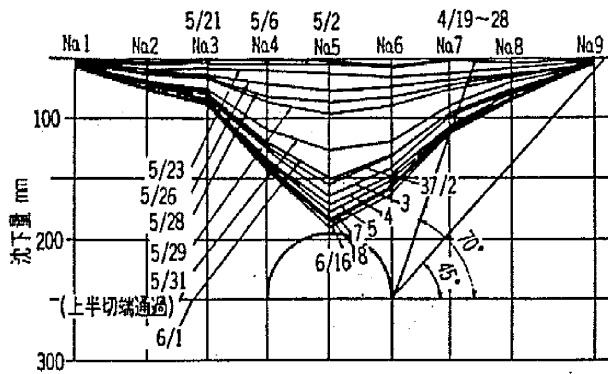


図-1 トンネルの経日別横断沈下量（奥羽本線きみまち坂トンネル、昭和45年）

1-2 トンネルの土圧の基調は変らない

これは筆者の信念だが、ロックボルトや吹き付けコンクリートで構成される支保、または1次覆工の役割りは、トンネル周辺地山におけるグラウンドアーチの形成である。かくしてNATMにおける土圧理論もアーチアクションの中に統一的に表現される。すなわち、工法が在来工法からNATMにかわってもアーチアクションで代表されるトンネルの土圧の基調は変らない。

そこで、アーチアクションについての知識を、若干、筆者流に整理してみることにしよう。

1-3 村山博士の実験

昭和43年京都大学防災研年報に報告された村上博士の実験（砂層内部沈下部にかかる垂直土圧）について見て見よう。凝集力のない粒状体の中にあられる実際のすべり面は、村山朔郎博士の落し戸の実験によって理解できる（図-2）。それによれば、落し戸の上には水平であった等圧線の沈下によってわかるように、沈下曲線が明らかに認められる。沈下曲線が落ちこむ変曲点を連ねた線は明らかにすべり面であり、このすべり面は水平面とおよそ $45^\circ + \varphi/2$ をなす（ φ は粒状体の内部摩擦角）。すべり面は落し戸の両側にできるが、落し戸の落下に追隨して下降するカメラを通しての観察によって、すべり面とすべり面の間、すなわち空洞の直上部には楕円形の領域があって、その外側では粒状体がすべりを起こすことなく沈下することが認められた。村上博士は筆者の逐次破壊説と関連させながら、この領域（包絡線）がテルツァギのいうグラウンドアーチに相当するものであると考えた。

1-4 周壁の逐次破壊説

これよりさき、筆者は、「湧水と地圧」（山海堂、昭和38年）という小著の中でグラウンドアーチは周壁地山内部の逐次破壊によって形成すると考えた。すなわち、もし、かりに掘削後の応力状態によってトンネル周辺の地山が破壊すると、地山を構成する岩

盤は岩石塊の集合体に変化する。天盤が支持されなるときは、周囲との連けいを失った岩塊は空所に崩落する。これによって、たとえば側壁底部を通り、水平線と $(45^\circ + \phi/2)$ をなすすべり面が周辺地山の中に生ずる。すべりの結果、周壁の押し出しによって内空断面が縮小しすべり面上の動きがとまる。次に第2のすべり面ができる。このようすべり破壊がトンネル周壁の頂部にまで及ぶ結果（逐次破壊）、各すべり面の包絡線によって囲まれて安定した一つのゾーンが形成されると考えられる（図-3）。これがテルツァギのいうグラウンドアーチにほかならない。このアーチは支保工による支持が弱いと周壁のゆるみを誘って大きく成長する。このように考えたのである。これが、先の村山博士の実験結果と照合するために引用された。

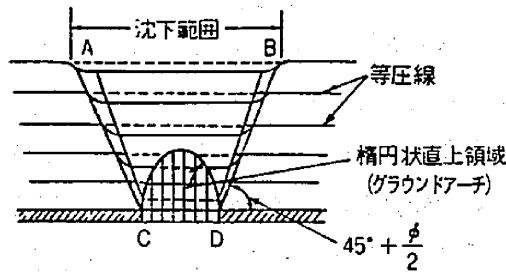


図-2 落し戸実験におけるすべり面と粒状対の運動
(村山朔郎、昭和43年)

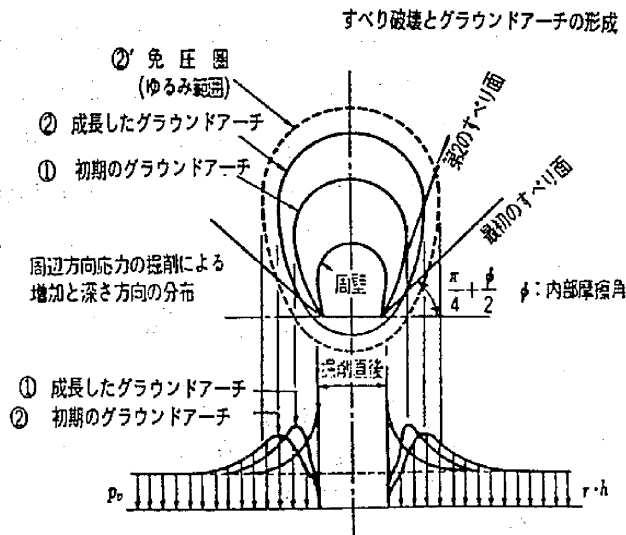


図-3 増加応力→周壁のすべり破壊→グラウンドアーチの形成
(昭和38年)

2. トンネル上部の切り取りと盛土

トンネル上部において行われる切り取りと盛土とは、トンネルに対してどちらが影響がおおきいであろうか。

また、切り取りと盛土ではどのように違うのであろうか。そこで、砂箱を用いた実験を行い、いろいろと示唆に富んだ結果が得られている。

実験の結果を要約すると、次のようになる。

すでにグラウンドアーチが形成されているトンネルの上部に盛土したときは、トンネルに作用する土圧の増加はほとんど認められない。これに反して、トンネルの上部で切り取りや開削が行われると、グラウンドアーチが破壊されて大きな荷重増加が見られる。これは、図-4を見れば容易に理解されることである。

このように、上部で工事が行われる場合、切り取りの方がトンネルに対してダイレクトに作用し、影響が大きいことがわかる。しかし、大糸線外沢トンネルでは、上部がずり捨場に利用されて圧潰した。これは、戦争が終った直後のころというだけで、その発生時期は明らかでないが、そのときの貴重な写真である（写真2、A・B）。破壊は、土かぶりが浅いので、グラウンドアーチおよび覆工の耐力を超える荷重が作用したために発生したと考えられるが、写真でわかるように、崩壊前にすでに変状したトンネルである。圧潰とは、崩壊の様相が原型をとどめず壊滅的であるという印象から表現したものである。

坑口付近の掘削に際して、よくトンネルの上部斜面に地すべりの現象を起こすことがある。写真-3は模型実験による状況を示したものである。左側のトンネルを下方へ落して上部の地山にすべり破壊を発生させたとき、右側の既設トンネルに影響を与えている様子がわかる。その際、右側は模型トンネルが挿入されているので原形を保っているが、明らかにすべりの影響を受けていることがわかる。

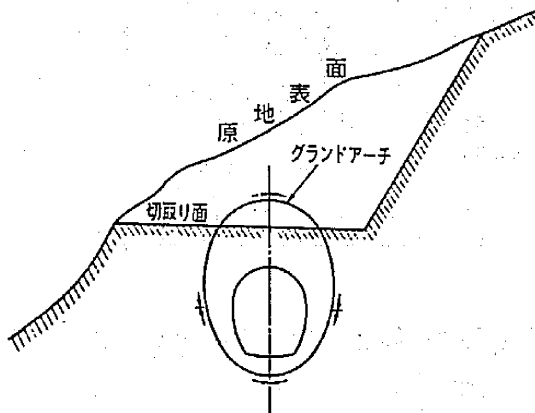
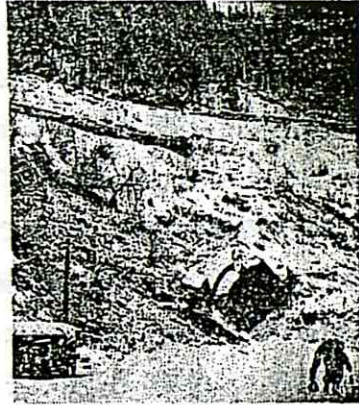


図-4 切り取りによるグラウンドアーチの頂部切除

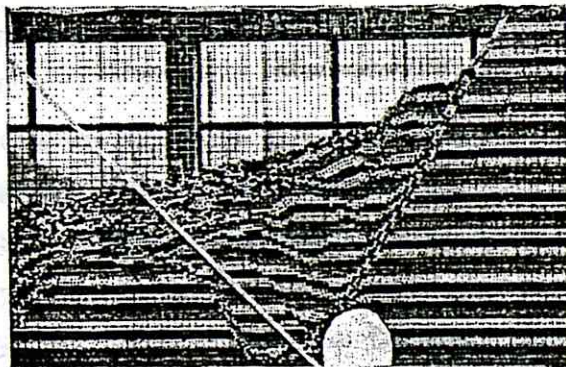


A. 崩壊前の変状 (28.12. 4)



B. 崩壊後

写真2 トンネルの崩壊一圧潰 (大糸線外沢トンネル)



新設トンネル既設トンネル

(崩壊)

写真3 山腹斜面下のトンネルと地すべりの現象 (昭和37年)

3. トンネルの改築について

経年のために老朽化したり、継続的に作用する土圧のためにトンネルは変状する。車両の大型化や、トンネル内施設の改良・増設に対して内空断面が不足する。このような場合、トンネルの拡幅や改築が必要となるが、鉄道トンネルのみならず、鉄道のトンネルにおいてもその必要性が増しつつあるように思われる。

筆者は、長年、鉄道トンネルの変状と保守に関係し、その集大成として、「変状トンネルに作用する土圧の傾向と調査指針」（鉄研報告、昭和43年）や「トンネルの変状と保守」（土木工学社、昭和52年）にまとめているが、いまでも筆者の年頭を離れないのは改築に際しての留意事項についてである。それは、鉄道トンネルの例であるが、列車を通しながら、つまり営業運転のあき時間帯を利用して行われる、いわゆる「活線中の工事」ではほとんど発生していないような崩壊事故を「休止線の工事」に際して起こしているのである。何故であろうか。そこで、改築というアクションがかかえている問題を整理し、共通の認識としておく要請があったのである。いうなれば「トンネルの改築の論理」である。

営業中トンネル改築（活線改築）の困難さは別にしても、トンネル改築は、新しく掘削される場合に比べていろいろの制約と困難を伴う。その原因は、見かけ上はある平衡を保っているにしても、既設トンネル周辺の地山は、掘削によっていったん乱されたものであるということにある。

筆者らが変状トンネルに関係するようになった昭和30年代初期のころは、たとえば、^{きすすき}木次線下久野トンネルや伊東線宇佐美トンネルなどの改築は、活線中の工事がほとんどであった。それが、複線化計画の時代を迎えた40年代前後のころからは、改築が必要な変状トンネルを含む区間の複線化工事を先行して行い、営業線をこれに切り替えたうえで、変状トンネルは休止線として改築工事が行われるようになった。そこで驚いたことは、それまでの活線中の改築工事ではほとんど発生していないタイプの崩壊事故があらわれるようになったのである。その最大の理由は、工法の差にあるように考えられる。

活線中工事では多くの場合、覆工内側に防護セントルが内そうされていて、取り壊し掘削された地山は別の支保工（外側支保工）で支えられたうえで、その両方が相互に連繋して地山の荷重を受けている。

休止線の場合は、内空側を防護するセントルが省略されていることが少なくない。

この防護セントルは、単に内空への覆工材のはく離落下防止の機能をもつだけでなく、実は、上部掘削時に側壁コンクリートの前傾を防止するとともに、外側支保工の補強に役立っているのである。つまり、建設トンネルにおいて、強圧区間対策としてよく用い

られる増し支保工と根固めコンクリートの両方の機能を果しているものと考えられる。上部半断面掘削後、逆巻きで施工されたアーチコンクリートが、下部の不用意な掘削で沈下し、ある場合には、改築を余儀なくされる例が少なくない。これと同じである。

4. 押え盛土の魔力

押え盛土は不安定な斜面の山止めや沈静化に不思議に思われるほどの効果を発揮するが、トンネルにおいても屢々あるいは日常的にその恩恵に浴している。ずり足場やリングカットにおける核残しから、変状防止や側壁強化のために行われる根固めコンクリートや抱きコンクリート、捨てコンクリートや胴張りなども同じような機能と効果をもっていると考えられる。ずり足場を不用意に撤去して土平や側壁の崩壊の危険を招くことは、日常的に経験していることである。ずり足場とか押え盛土とは違うが、大背のとり過ぎがアーチコンクリートの崩壊に連がる場合が意外と少なくない。

筆者は建設業界にあって、明かり工事でも次のようなことを経験している。

たとえば、ダム基礎岩盤の造成（掘削）中に左岸の岩盤に亀裂が入り、山頂に立つ送電線鉄塔へ影響することが懸念されたとき、また、ゴルフ場の造成中に、やはり斜面の上に立つ送電線鉄塔の足もとに達するような亀裂が入ったとき、それぞれ押え盛土で崩壊を阻止できた経験をもっている。

前者は、年の暮も押しつまって御用仕舞いを、今日、明日に控えたところである。ある県営ダムの工事現場から連絡を受けた筆者らは、急行して、ダムアバット部の下部を斜めに切る基盤の中のすべり面を確認し、所長らと相談して押え盛土の採用を決定した。重機により斜面基部に施工された押え盛土は即効性を発揮して、亀裂を発生した斜面の動きは急速に減衰し、一昼夜ほどで、ほぼ停止したことが計測によって確認された。これに入念な保安処置を講じて工事関係者は安心して正月を迎えることができたのである。

後者の場合は、すでに完成していた8番グリーンを埋めてしまい、新しいグリーンがつくられたのである。

失敗例もあり、反省している。昭和40年代のころ、ある主要線区で7,500m³の切り取り斜面の崩壊が発生した（写真-4）。崩落ずりを足場にして、不安定岩盤を長いロックボルトで固定するなどの案も検討されたが、ずりを排除して線路を早く開通する要請があり、ブルドーザによる排土作業が早め早めに進行して、結果的に土量約1,8010m³ほどの再崩壊を起こした。最初は10日ほどで線路を開通させる見込みであったが、再崩壊によって開通までに24日もかかってしまったのである。これなどは、まず排土作業を中止しておいて、対策案を詰めるべきであったと思う。臨床医学の立場では、重症患者はできるだけ現状のまま身体を静かにしておいて必要な処置を行うとされている。

(平面的状況)

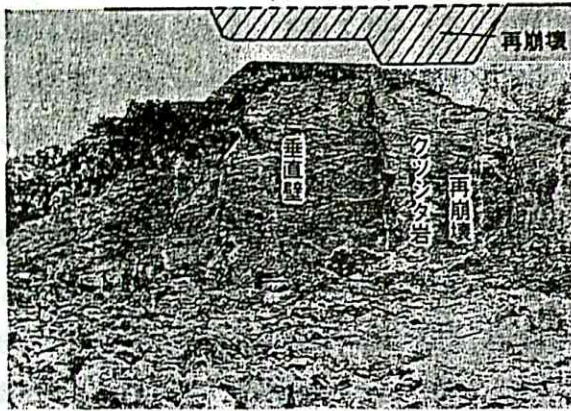


写真-4 岩石斜面の崩壊（昭和42年）

5. 地球のやさしいルートについてのアドバイス

建設事例の増加、施工技術の向上、機械化の進展などを背景として最近、長大トンネルが抵抗感が少なく計画されるようになってきたと見るのはやはり一般的な見かたであろう。トンネルの長大化は線形をよくし、ルート選定をやりやすくして、これまでは敬遠された山岳横断ルートを可能にし、住居地域を避けたバイパス的ルートが自由に設定されるようになるなど、交通上、経済上、はかり知れぬほどの利便を提供している。その反面、工事を阻害する要素としての土圧現象と湧水の規模が増幅してあらわれるために、強大な土圧や大規模湧水のため工事の進行が阻害されたり、周辺の水利用に影響を与えるという問題が生じている。

山岳横断路線ではやむを得ないが、そうでない路線の場合、トンネルのルートは山深く潜入することをできるだけ避けるべきであろう。山が深ければ、それだけ湧水が多い。軟岩や破碎帯などでは土圧が強大となる。盆地の下もそうである。深い立坑や斜坑によらなければ掘れないことになり、地質条件が悪い場合には着工後であっても計画変更の問題が顕在化しかねないのである。トンネルにカーブを入れて、山腹斜面の縁辺に沿った地下水面上のルートとすることが可能な場合が少なくない（図-5）。地形的偏圧や地すべりの現象を誘発しないだけの深さがあれば、山腹斜面に近く、山は浅いほどよいようである。長大トンネルでも、このような考慮を払うことによって、小規模の横坑や斜坑で区分を分割し、工期を短縮することも可能である。直進しても地質が悪いために工期が延びる、工費が嵩む、そのハレーションがおこるなどのことを考えると、トンネル部分で距離が伸びても時間距離はそんなにひびかないことを考慮すべきである。

青函トンネルの青森方は、調査坑（斜坑）や先進導坑を掘削したところで、原案の本トンネルのルートが「玄武岩の巣」といわれるような大湧水量を伴うおそれのある地質条件のところを通ることがわかったので、これを避けるために本トンネルの位置を東側

に移してカーブを入れている。その結果、ルートはそこで「くの字型」となっている。つまり、あとの使用にさしつかえなければ「曲げた方が楽だ」ということであれば曲げたらよいとは、高坂紫朗氏との「新春対談」で藤井松太郎氏がいわれたことである（トンネルと地下、昭和50年1月）。

むずかしいトンネルになかで、屢々問題になるのが坑口付近における地すべり、または崩壊現象の問題である。筆者は、これを「トンネル工事における地すべりの現象」と呼んだが、それは、以前から地すべり地や崩壊性の地質であったところにトンネルを掘ったのであるかが問題である。

表-1 弾性波探査における低速帯

トンネル名	地 質	ノルマル帯 (V_p km/s)	やや低速帯 (V_p km/s)
折 渡 (羽越線)	第三紀泥岩 (中新世)	2.3~2.7	1.2~1.9
芦 谷 (羽越線)	閃 緑 岩	4.3~4.5	3.7~4.0 (2.0)
新高場山 (飯山線)	第三紀泥岩 (中新世)	2.2~3 (岩石試片に ついて)	1.8~2.0 (全 域)
米 山 (信越線)	第三紀泥岩 (中新世)	2.2~2.4	1.5~2.0 (0.8~1.2)
大 杉 (土讃線)	黒色片岩および緑 岩片岩(古生層)	4.5~5.0	2.5~3.8

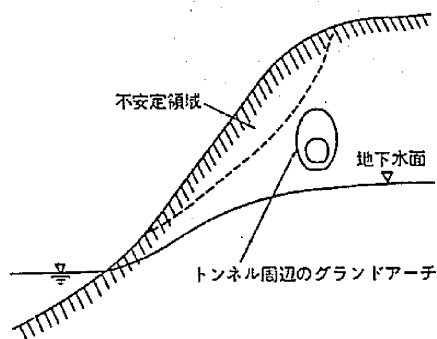


図-5 地下水面上のトンネル

この表-1にあげられたトンネルは、工事中に強大な土圧を受け、中には崩壊を起こしているものがある。ここには鉄道トンネルの場合を示したが、昭和50年前後の道路トンネルでもこの種の事例はこと欠かないようである。すなわち、日本道路公団から委託を受けて行われた高速道路調査会からの報告書「トンネル坑口周辺の地すべり・崩壊対策に関する研究報告書」(昭和54年、55年、56年)および「地すべりおよび斜面崩壊の防止対策の調査法に関する研究報告書」(昭和53年)がある。

表-1は弾性波探査で問題とされた「やや低速帯」に関連したトラブルが、トンネル坑口付近に多く発生していることは前にも述べているが、その要因の多くは「深層すべりによって地塊がゆるんでいる」可能性がある。それが工事の計画、あるいは施工段階においても意外に注意が払われることが少なく、着工後にトラブルの要因となっている事例が多い。したがって、この種の問題についてはトンネル、ダム、斜面などすべての建設工事に関連し、これに適切に対処する必要があるということで、特に注意を喚起しておきたい問題である。図-6は滑動地塊のゆるみの発生機構について示したものであ

る。

傾斜地の斜面や台地の切土造成中にオープンクラックが発見されたり、山腹において地下水面が異常に低く、なかなか見つからないということがある。トンネルのある区間、特に坑口付近に多いが、地層の組織がルーズで予期しないような高い土圧が作用することがある。筆者の経験によるとこのような地質現象を示す地域は多分に全山もしくは、その一部が深層部のすべり面に沿って滑動した地塊であることが多い。

その特徴は古い大規模な地塊の滑動であり、現世的には滑動を起こしていない。

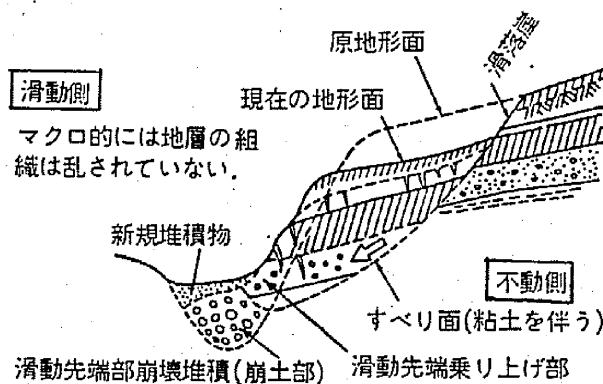


図-6 滑動地塊の緩みの発生機構

地層（地塊）の組織はマクロ的にはあまり乱されていない。組織の弛緩は多数のクラックや大小ブロックの転移などによって生ずる。すべり面のところでは破碎帯の幅広い（厚い）粘土層が形成されていることが多い。クラックは規則的、あるいは不規則的で、開いていたり、閉じていたりする。部分的には圧潰されて粘土化し、間隙を充填しているものもある。水は部分的に貯えられていたり、また逸水して失われているという特徴がある。

深層すべりによる地塊はこのようなことによって特徴づけられるが、このような場所にトンネルが掘られたり、切り取りが行われるときは、活性化して激しい土圧現象が誘起されることになるので、事前の注意が必要となる所以である。

6. トンネルの湧水について

6-1 トンネルの湧水

切端におけるトンネル湧水は地下水の自然流出であり、多くの場合は流出時間の経過にしたがって水面こう配、流出量、流出点の高さなどが変化する。この現象は地下水の非定常流出と呼ばれている。一般にトンネル湧水は当初に大きく、後は次第に減少してある一定量を示すように現われる。その状態は図-7に関して図-8で示されている。1)

切端におけるトンネル湧水の流出量は、地質の状態や地下水貯溜槽の容量などの相違によって遅速の差があるが、数時間ないし数週間の間にはほぼ平衡に達するものであり(定常状態)、トンネルの全延長から流出する地下水量がすべて平衡流に達した状態における水量を基本に考えるのが適当のようである。その過程は標準的には(1.1)式および図-7に示される。

滞水槽または地下水貯溜槽に対する最初の開孔(掘削)は、透水断面が完全かつ不変の状態には形成されないで、初期の流出量は(1.1)式の q_0 より小さく、その直後の減衰は標準的な形に従わぬことが多い。しかし後期においては湧水量の自然減衰曲線はきわめて安定した状態を示すのが普通で、そのころには透水路がほぼ完成していることが理解される。

図-8は切端におけるトンネル湧水の減衰曲線の代表的なものを示したものである。滞水層の透水性が大きく、地下水面からの深さ(H)が大きい場合には平衡状態における流量すなわちAの部分が大きく現われる。平衡流に達するまでに流出した地下水の総量はBによって示される。すなわちAは滞水層の透水性に関する条件を、Bは滞水層また地下水貯溜槽の容量に関する概念を与えるものであり、AとBとの間には直接の因果関係はありえない。減衰曲線の曲率は透水性に比例し、透水性が大なるほど減衰が急激に現われる。曲線の高さすなわち初期流出量(q_0)は地下水面からの深さ(H)が大きいほど大きく、平衡流量(q_u)は水源における水の供給に関する。

坑口付近、および深さの浅い場合を除けば、トンネル湧水は季節的あるいは降雨による影響の少ない流出量が得られる(地下水の根源は雨水の浸透によるものであるから、実際には降雨の影響をうけるはずのものであるが)。多くのトンネルにおいては、貫通後間もない時期に測定された流出量と、その後の流出量とがほぼ等しい。(表2)また多くの坑内出水に関しても季節的に影響の少ない流出カーブが得られている。1)

表-2 トンネル湧水量の経年変化
(不変性)

トンネル名	延長 (km)	湧水量 (m ³ /min) () 内は測定時期	
		当初	現在
丹那トンネル	7.8	75 (1934)	78 (45.7 64) (1941-4) 国鉄静岡幹線工事局
清水トンネル	9.7	35.7 (1931)	27.6 (土倉 14.6 (1963-6-7) 土留 13 (1961-6) 国鉄伯耆川工事局)
深坂トンネル	5.17	4 (1953)	3.9 (1961-7-5) 国鉄技術研究所
常盤炭鉱	—	90 (1955)	100 (1960) 磐城鉱業所

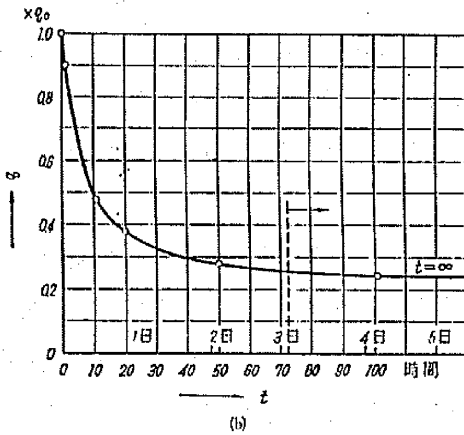
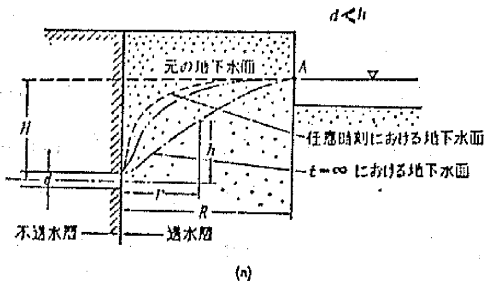


図-7 トンネルに流出する地下水の非定常流出

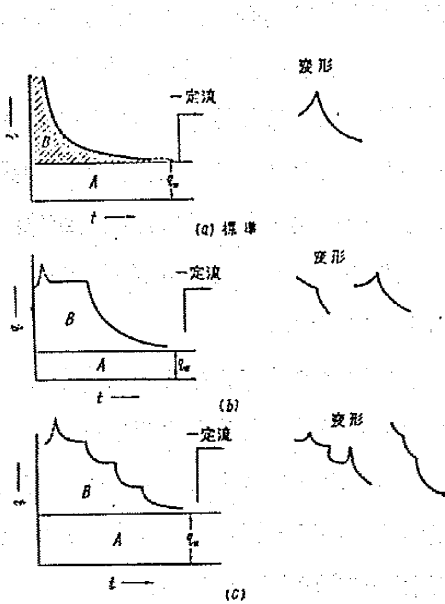


図-8 切端に流出する地下水の減衰曲線の变形

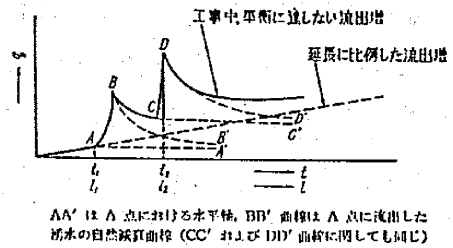


図-9 掘削中のトンネルの湧水

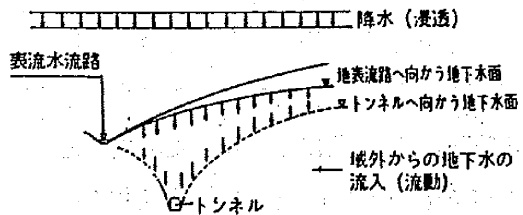


図-10 トンネルに向う地下水面の形成と降水による水補給(浸透)

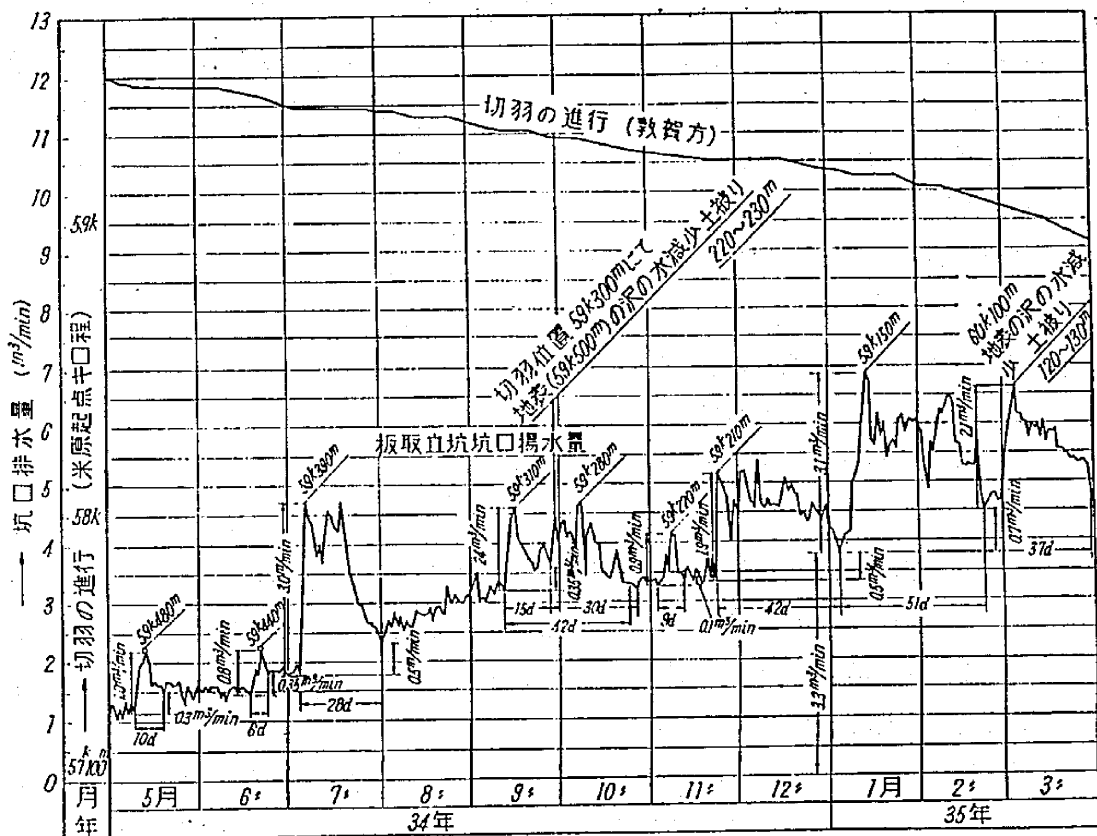


図-11 工程一流出量実績グラフの部分図 (59,400-58,920km)

以上のように、多くのトンネルにおいては、一旦平衡流に達した湧水量は、見掛け上、気象あるいは季節的影響を受けることなく、長年月間ほぼ一定流量を示す。これはトンネル湧水の不変性を示すものといえよう。

トンネル湧水の特徴は、(1)初期には高圧・多量であるが、次第に減衰してある一定量を示すように現れること。(2)この状態にある湧水量を恒常的湧水量とよぶが、これは坑口とか土被りの浅い場合を除けば、季節的影響をうけること少なく、極めて安定した水量を示す。(3)このときの湧水量は、そのほとんどが地下水のみで涵養されている河川の湧水時流量に類似している。筆者はこのような特性とこれに簡単な水理計算や地質学的あるいは水文学的なテクニックを用いてトンネル湧水を予測する方法を提起した。これは簡便法であり、「高橋の方法」として知られている。ここには詳しく紹介することはできないが、昭和39年および昭和44年に制定された土木学会の「トンネル工事標準示方書」の中の「湧水調査」および「湧水調査」の記述を引用することにしよう。

第16条（湧水調査） 排水設備の設計および湧水時の処置と施工方法、等の資料を得るために、湧水の有無、滞水状態、出水状況、等について調査しなければならない。

第17条（湧水調査） トンネル工事のために影響の予想される範囲の地下水および用水については、着工前の状況を明らかにするようにしておかなければならない。

トンネル工事に伴う湧水現象はトンネル湧水の結果として現れるものであるから、調査の手順は湧水調査の場合と異なるところはない。

しかし、湧水問題は、社会的に影響する範囲がきわめて大きい場合があるので、着工前の調査においては将来計画等も考慮に入れて水利用の状況を調査しておく必要がある。

補償は着工前の状態に復元することが前提となるから、とにかく着工前に十分な調査を行うことが何よりも大切である。

6-2 トンネル湧水（恒常湧水）の長期的傾向

トンネル湧水は掘削後、相当時間を経過してある恒常状態に移行するが、その後もある程度低減を続け、真に恒常の状態に達するまでには一般に建設後数年を要する。図-13はトンネルの貫通点の恒常湧水量（ Q ）と5年ほど経過した時点での恒常湧水量（ Q' ）との関係を示したものである。これは共同研究者であった故石井政次氏の研究成果である（鉄道土木、昭和48年、ほか）。

図-13には $Q' = Q$ 、 $Q' = 0.8Q$ および $Q' = 0.5Q$ の3本の直線が示してあるので次のことが容易に読みとれる。貫通後数年経過したトンネルの恒常湧水量は貫通時点でのそれに比べて80%から50%の範囲まで低下するものが少なくないのである。

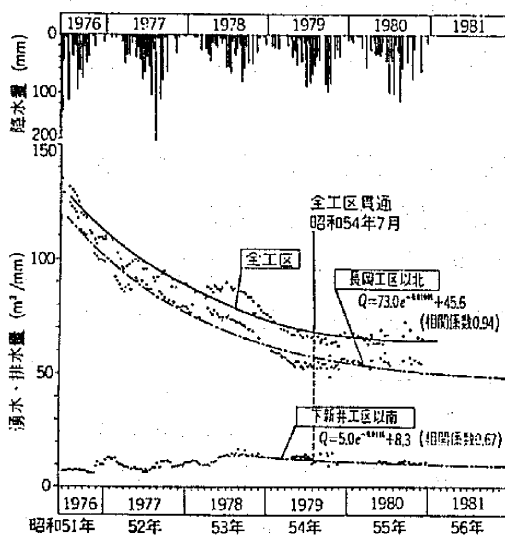


図-12 湧水量と低減曲線（榛名トンネル

上越新幹線地下水調査委員会資料）

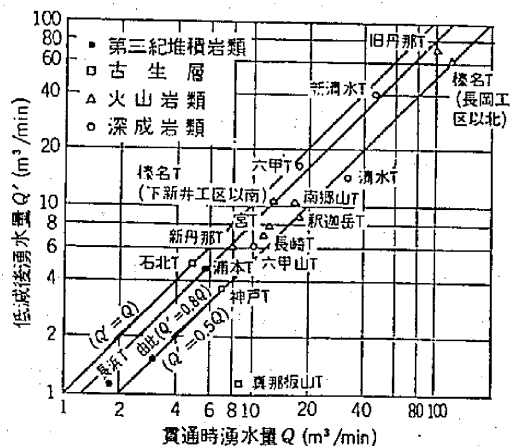


図-13 貫通時湧水量と低減後の湧水量

（石井政次および上越新幹線地下水調査委員会資料）

地下水の流動や地下水面の変動が降水に関連してあらわれるのは当然であると思われるが、だからといって、常に両者の間に1対1で対応するような直接的な関係が存在すると考えるのは一般的でないと思われる。

筆者は、かつて、図-10を提示したとき（鉄研報告、279、昭和37年1月）、地下水面形成のメカニズムとして、継続的な降水によって地山が完全に飽和した状態に移行するまでの経過があり、一方、流出量についても地下水面の低下に対応して恒常状態に到達する課程のあることを説明している。地山内部の飽和状態についても、地下水面が深いとか、被圧水との交流・合成があるなど滞水層の水理的、または地質的条件が複雑になるほど単純一様でないことが考えられる。したがって、このような説明は非常に大まかな巨視的立場からなされたものである。

モデル的にも単純であって、浅処を流動する地下水の場合は別として、トンネルの湧水は深くて複雑な水理条件をもった線状の長い管路に地下水が流出する問題と考えられるので、降水分布に対応するといっても、その対応の仕方は一般に、一々の降水や、あるいは当該年度の降水分布との対応が明らかでない場合が多いと思われる。このあたりにトンネル湧水の問題に対する、いわゆるマイクロなアプローチがあって展開を異にする場合があると思われる。

地下水流動の根源は降水に他ならないので、恒常湧水量も降水量の大小、時間的分布季節的変動などの影響を受けて変動する。すなわち、恒常湧水量の変動は降水量分布や季節的諸条件に対応したある変動の幅（振幅）とくり返し（周期）によって示される（図-12および図-14参照）。この変動幅とくり返しは、それぞれのトンネルについて固有の特性ということができよう。土かぶりが大きく透水性が小さい場合ほど降水との関係はより間接的となって、変動幅が小さくならかとなり、季節的変動も当該降水年の状況を示すとは限らない（図-12、図-14および図-16参照）。場合によっては1年前、2年前、もしくはもっと以前の季節的変動を反映する場合があるようである。このように大きな時間的なズレを伴った降水と恒常湧水との間接的な関係については、前述のような地下水の不飽和浸透と関連して考えた方が理解しやすいと思われる。

先に示された図-12は上越新幹線榛名トンネルの、図-14は山陽新幹線福岡トンネルの恒常湧水量の長期観測の結果を示したものである。実際には、季節的変動が識別されるほど恒常湧水量の長期的観測が行われることはきわめて稀であり、福岡トンネルや榛名トンネルの事例は貴重である。福岡トンネルの場合、通年の傾向としては季節的変動は認められるが、その変動の状況を降水量やその頻度との関係で比較しながらやや仔細に見ると、恒常湧水量のレベルの高さ（量）や微変動の状況は必ずしも当該降水年の

状況を反映しているとはいえないようである。榛名トンネルの場合(図-12)、昭和54年頃には恒常状態に達したと思われるが、その後の状況については、「季節的変動を示しているようである」としかいいようがない。

同じように、地下水流出の現れである温泉や湧水についての観測データは、トンネルの恒常湧水の長期的傾向を考えるうえで参考になる。図-15の弁天湧泉については顕著なピークがあらわれていて、これは降水分布と対応しているようであるが、滝の沢温泉の場合はピークが顕著でないのは測定頻度の関係によるものであろうか。何れにしても、ピークを除外したときの湧泉の量の水準の傾向と降水量分布との関係は明瞭でない。

深いところに流出しているトンネルの恒常湧水や温泉などの長期にわたる観測結果では、季節的変動の強弱を含めて流出量と降水量分布との間にこのような乖離、あるいはズレが存在するということとは、どのように考えたらよいであろうか。それは割れ目透水を主とする媒体を含めて、滞水層の平均的透水係数を 10^{-3} または 10^{-4} cm/秒のオーダーを仮定し、流入を直上領域からの浸透だけに限定して考えてみても、地上に降った雨が100mの深さに達するには100日とか1,000日もかかることを考えれば理解できることであろう。落合敏郎博士は昭和43年の地下水学会水文地質シンポジウムで、昭和27年以降くり返し行われている水素爆弾の実験から放出される灰の中のトリチウム(三重水素)が、丹那トンネル西口から出る湧水では検出されたが、東口の湧水からは検出されていないことを発表している。いつの水爆実験のときの灰によるものであるか不明であるが、深部地下水の流動には長年月かかることを示唆していると考えられる。

その他、湧水量計測の精度の問題や、山間部における降水量分布の局地性、降水観測所の位置とそれがカバーする範囲など多くの課題があり、降水ごとにそれに対応して恒常湧水量が変動するといったデリケートな問題を議論するためには、それらの課題をクリヤーしている必要があると思われる。したがって、降水量分布に地下水面が連動し、あるいは流動する状況を解析するなど降水との関係で地下水問題を研究される場合には、ここで述べられたようなことを包含して、さらに検証されるように期待したい。

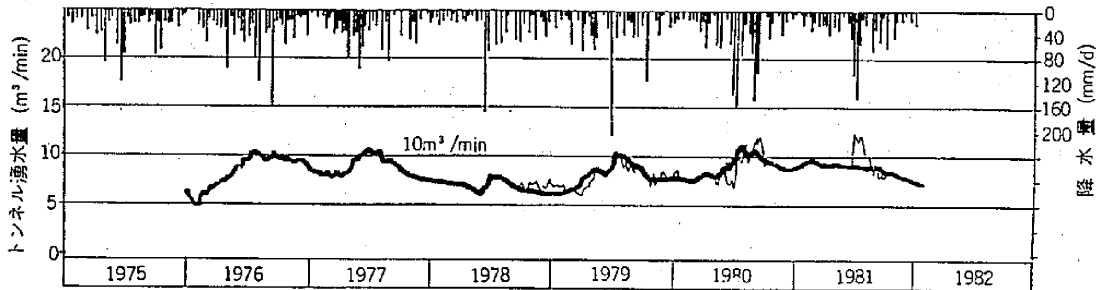
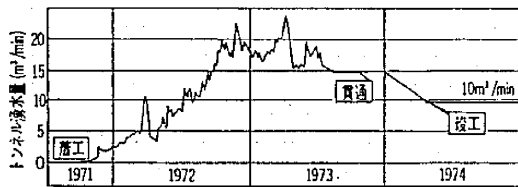


図-14 恒常湧水量の季節的変動（福岡トンネル、大島洋志、鉄研報告、昭和58年3月）

表-3 トンネル湧水に関連する工学的問題の発生

水理的問題	トンネルへ地下水の流出	湧水の量 水温	作業環境の低下, 工事阻害
		地下水面の低下	水利用への影響（湧水問題, 利用水面の低下） 地盤沈下
岩盤工学的問題	地層の物理的性質の変化	支持力低下, 遮水壁（地層）の破壊, クイックサンド（流砂）	切羽の自立性の低下, 土圧の増大, 落盤, 地層の流出, 坑道の閉塞
	坑道周辺のゆるみ	吸水間隙の増大	膨圧, 地層のスコーリング
完題成（トンネルの維持・管理状態）	掘削周辺の地下水	湧水	排水不良, 道床噴泥
		浸透水	盤膨れ, 路盤噴泥 土圧増大—覆工の変状・破壊
	凍結	側水, ツララ, 側壁の押し出し	

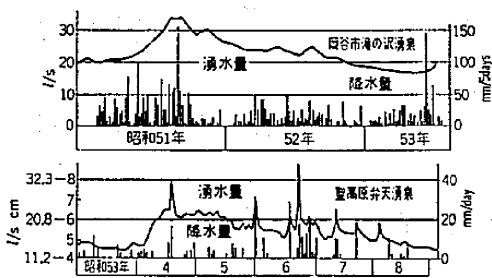


図-15 湧泉量の経時変化（大島洋志、鉄研報告、昭和58年）

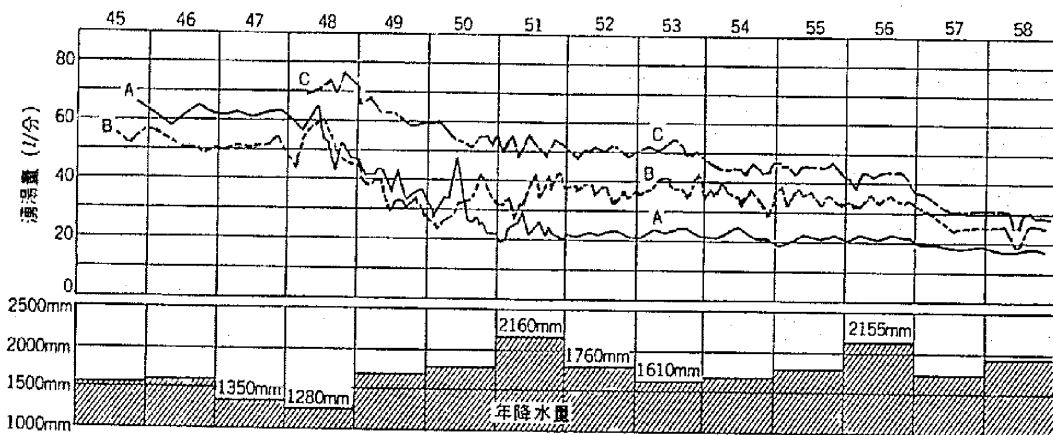


図-16 温泉湧出量の季節的変動

7. 砂漠に関する話題（日本の地質とエンジニアリング、高橋、1992）

7-1 砂漠について

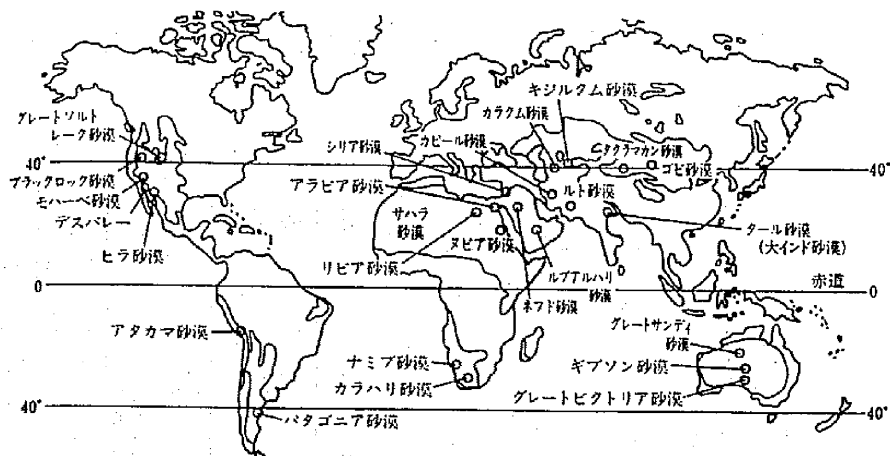


図-17 世界の主な砂漠の分布（基図はリーダースダイジェスト社、1980年9月「すばらしい自然」水の乏しいところ）

（注）記載の砂漠は理科年表の「世界の主な砂漠」と対応している。

〈気候帯の区分と砂漠的環境〉

気候帯については、一般に、寒帯-温帯-熱帯の区分で知られているし、また、乾燥帯-湿潤帯の区分もある。森林沃野から不毛の砂漠に至る地形的景観は、気候学でいうところの「有効水量の気候的傾度」と密接な関係があり、気候帯はまた、次のように区分されている。

湿潤帯	森林 (forest)	栄養のある腐蝕土と豊富な降水量があり、森林沃野が形成されている。
	サバンナ (savannah)	暑い乾季と雨季の区切りが明瞭で、低木が散在し、熱帯草原が形成されている。

——— 乾燥限界 ——— (降水量と蒸発量が等量である気候帯)

乾燥帯	ステップ (steppe)	中緯度地方で、樹木が育つほど降水量がないために、大草原(温帯草原)が形成されている。
	砂漠 (desert)	植生がほとんど育たないほど降水量が少ないために、砂、砂礫、あるいは裸岩からなる不毛の平原が形成されている。

気候帯区分のうえでは、砂漠から森林帯までの移り変りの部分は草原の占める領域である。一口に草原といっても、砂漠の周縁相としてのステップ(短草草原)から森林帯外縁相のサバンナ(樹木の混じる草原)まで、また、その中間相のプレーリー(長草草原)などと多種多様である。その多くは、日本列島の地形景観としては体験しえないものである。

砂漠の定義：乾燥地や砂漠についての定義は必ずしも明確でないが、一般に、乾燥地とは降水量が極端に少なく可能蒸発散量の方が多い地域であり、砂漠とは植土と水分が欠乏して動植物がほとんど生息することのできない不毛の地域であると理解されている。

〈砂漠の種類〉

砂漠は、その構成物質やその形態、地理的条件などによって幾とおりに分類されているが、それぞれの呼称によって、その砂漠の状況についてある程度のイメージを持つことができる。次に、その代表的なものをあげてみよう。

乾燥砂漠

低緯度地方の熱帯砂漠

中緯度地方の内陸砂漠

海岸砂漠

これらの砂漠の分布については、年降水量250mmの等降水量線とほぼ一致するといわれている。

寒冷砂漠

永久冰雪砂漠：南極大陸やグリーンランドの冰雪平原がこれに相当する。

ツンドラ砂漠：凍土帯。

これらの砂漠は、年降水量が125mm以下の寒冷地域に達している。

景観上は次のような表現がある。

岩石砂漠：裸岩が露出していて、その上に大きな礫や岩塊が散在している。砂でおおわれているところは極めて少ない。砂はほとんど堆積していない。

砂砂漠：一般に、砂丘で代表されるが、砂が集積して砂丘や砂床（または砂原）でおおわれている。砂丘の高さは、高い方で100mから200mに達し、最高では中国のバダイアンジャラン砂漠の400mがある。砂丘の位置は、一般に絶えず変動している。

礫砂漠（ゴビ砂漠、ゴビ灘）：裸岩が気温の変化によって崩壊し、岩屑が分解して礫を生じ、礫が低所に堆積している。岩屑、砂礫の層は一般に薄い。厚いところでも1～2m程度である。

降水量と蒸発量が等量である気候帯は、乾燥限界と呼ばれているが、気候帯はまた、これによって湿潤帯と乾燥帯に区分される。その乾極に相当する地域が、砂漠である。どの気候帯でも規模が大きい場合には、表面形状は相当の起伏に富み、山稜と河谷が存在する。すなわち、一般に大地形のうえでは、砂漠地域にあっても山稜と河谷と平原が存在している。地球規模で出現する気候は、それ自身のサイクルをもって変動しているが、氷期、または氷河時代と呼ばれた過去の寒冷なある時期において、例えば、現存する熱帯砂漠のサハラ砂漠でも、温暖な気候の下で河谷には水が流れ、森林沃野が出現していたであろうと考えられている。

7-2 中国の砂漠

表-4 中国における砂漠の概況

	砂漠名称	およその大きさ (A:面積)	所在地と概況	出典
1	塔克拉玛干砂漠	A=32.4~37万km ² 東西の長さ 約1,000km 南北の幅400km	新疆ウイグル自治区西南部のタリム盆地内に発達。三日月状砂丘。砂丘の高さ70~80m、西部に行くほど高くなり、200mから250mに達する。	1, 2, 3, 4 (*1)小学館, 昭和44年, 大日本百科事典, 第11巻, p.525, 青木千枝子
2	古爾班通古特砂漠	A=6万km ²	新疆ウイグル自治区西北部のジュンガル盆地内に発達。半固定砂丘が多く、その高さは30~40m。	1, 2, 3
3	合順砂漠 (塩類砂漠または伊勒呼砂漠)		新疆ウイグル自治区中部のハシ盆地南東から南へ白竜堆砂漠までの間に発達。	1, 3
4	白竜堆砂漠 (庫姆塔格砂漠?)		新疆ウイグル自治区中部のロプノルの東から甘肅省玉門関にかけて発達。礫質(ゴビ)の砂漠。角形の小山, 岩塔, 土柱が25~40m突出して高まりをつくり, 谷に流砂が堆積するなど竜のように曲がりくねっている。	2, 3
5	柴達木砂漠	砂砂漠 A=2万km ² ゴビの砂漠 4.5万km ²	青海省北部の柴達木盆地に発達。砂砂漠とゴビ質の砂漠が交錯。砂砂漠は三日月形の流動砂丘。ゴビは主に山麓の洪積台地に形成されている。	3
6 9	小戈壁		内モンゴル自治区西部。内モンゴル高原の西半部を構成する阿拉善高原は景観的には砂漠高原であり、小ゴビと呼ばれ、アルシヤ砂漠(東部)と黒ゴビ(西部)に区別される。	3
6	黒戈壁		黒灰色を呈している礫砂(ゴビ)の発達する弱水以西。馬崇山(甘肅省北部)の東までの間の地域。	3
7 9	阿拉善砂漠		小ゴビの東部に発達する砂漠の総称で、バグインジャラン、テンゲルおよびウランブフの3つの砂漠に分けられている。	3, 4
7	巴丹吉林砂漠	A=4万km ²	内モンゴル自治区西部から、西の甘肅省北西部にかけて発達。砂漠中心部に複合形砂丘、移動速度は遅い。砂丘の高さは200~300m。最高400mに達する。	1, 2, 3
8	騰格里砂漠	A=3万km ²	内モンゴル自治区西部から西の甘肅省中央部にかけて発達。三日月状砂丘、流動性、砂丘の高さ10~30m。解放後、砂漠対策が行われている。	1, 2, 3
9	烏蘭布和砂漠	A=1.4万km ² 東西の幅110km 南北の長さ150km	内モンゴル自治区中央部で南から北へ向かう黄河の西に沿って発達。中南部は流動性砂丘。北部は固定~半固定砂丘。解放後、防砂事業推進。	1, 2, 3
10	庫布齊砂漠	A=1.1万km ² 東西の長さ270km 南北の幅15~70km	内モンゴル自治区中央部の包頭付近を流れる黄河の南側に沿って発達。ほとんどが流動性砂丘。砂丘の高さ10m前後。	1, 2, 3
11	毛烏素砂漠 (烏審砂漠)	A=1万km ²	銀泉市(寧夏回族自治区)東方を流れる黄河の東側で、北は内モンゴル自治区中央部から南は陝西省北部にかけて発達。三日月状砂丘がチェーン状に連なる。砂丘の高さ4~6mから10~15m。解放後、防砂事業推進。	1, 2, 3
12	小騰格里砂漠 (渾善达克砂漠?)	A=1.5~2万km ² 東西の長さ300km 南北の幅50~150km	北京市の北からおよそ300km離れている。内モンゴル自治区中央部、陰山山脈(以西)と錫林浩特(以南)の間に発達。高さ10~15mの固定砂丘が主である。天然牧場となっている。	2, 3

*出典 1: 水文地質図集 2: 分省地図 3: 現代中国地名辞典 4: その他

注) なお、内モンゴル自治区の北東部で大興安嶺の西側と、同じく東部で未確認の次の2つの沙地が出典2(分省地図)に表現されている。

呼倫貝爾沙地: 内モンゴル高原の北東端に位置する。

科爾沁沙地: 内モンゴル自治区東部。

出典3(現代中国地名辞典)の記述から類推されるところでは、両沙地とも広大な草原のようである。

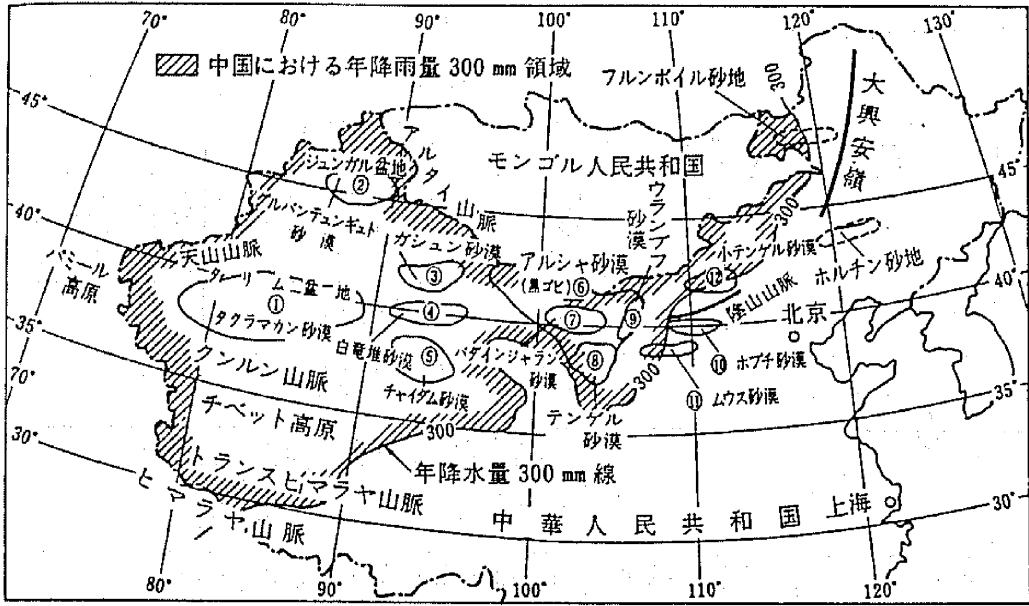


図-18 中国における砂漠の分布状況

7-3 砂漠化と防止策の問題点

表-5 砂漠化現象の等級区分

(中国科学院, 1982)⁷⁸⁾

砂漠化現象の等級区分	砂漠化程度の現象(植被率, 粘土分, 有機質含量等)
潜在砂漠化	地表面植被率 40% 以上, 粘土分 (0.01 mm 以下) 7~15%, 有機質含量 1~2%
軽度砂漠化	流砂地割合 10% 以下, 有機質含量 1% 前後, 粘土分損失率*30% 以下
中度砂漠化	流砂地割合 30~50%, 有機質含量 0.3~0.5%, 地表面植被率 30~40%, 粘土分損失率 30~50%, 砂丘高 20 cm 以下
強度砂漠化	流砂地割合 50~90%, 粘土分損失率 50% 程度, 地表面植被率 10~30%, 砂丘高 50~100 cm, 有機質含量 0.1~0.2%
極度砂漠化	流砂地割合 90% 以上, 地表面植被率 10% 以下, 砂丘高 100 cm 以上, 有機質含量 0.1% 前後, 粘土分損失率 50% 以上

*粘土損失率は潜在砂漠化の粘土分からの減少割合