

地質および地下水理現象の解明を基礎とした ナチュラルアナログの研究[†]

渡辺邦夫^{††}田中達也^{†††}三枝博光^{††††}

ナチュラルアナログの研究は、放射性廃棄物処分場周辺の、天然、人工バリアーの長期性能を確認するうえで不可欠である。この研究の重要点は、過去長い時間の間に起こった水理地質的な現象を明らかにすることである。この論文は、処分場の性能に与える地下水流れの長期的影響を評価するいくつかのナチュラルアナログ手法をレビューしたものである。まず最初に、岩盤中の割れ目発生過程を評価する手法を、釜石鉱山での調査結果とともに示す。次に、過去 1000 年もの長期にわたる地下水流れを評価する考古学的手法について述べた。地下室内における結露発生とその結露が地下室中の物質保存に与える影響についても実測と、古い墓の考古学的データに基づいて検討した。廃棄物処分場の構造や場所の決定では、こういった検討を基にすることが大事であることを結論づけた。

Natural analogue studies are indispensable to assure the long-term performance of the natural and the artificial barriers surrounding a repository of the nuclear waste. The most important point of the study is to make clear the hydrogeological phenomena that have occurred during long period of time. Some natural analogue techniques that can evaluate the long term effects of groundwater flow on the performance of repository were reviewed in this paper. At first, a technique for the evaluation of the fracturing process in an actual rock mass was proposed in this paper with the results of the geologic investigation performed in the Kamaishi mine, Japan. Archeological technique that can evaluate the groundwater flow in the shallow underground during past 1000 years was also proposed. Dew drop occurrence in the underground spaces and its effect on the preservation of materials in these spaces were investigated by the field measurement and the analysis of archeological data on the remnants found in tombs. It was concluded that the structure and the location of the repository must be properly planned on the basis of these natural analogue studies.

1.はじめに

ナチュラルアナログとは、廃棄物処分などの安全性を未来予測する 1 つの手法である。この手法は、自然の中で起こっている長期的な実際現象の丹念な観察と解明を通じて現象の未来予測を行うことに特徴がある。一般的に言って、未来予測は最終的には数学的な手法で行われることが多い。数学的な方法は、主要と思われる物理・化学的な現象を非定常的に数式表現し、想定される境界条件の元で解析するものであ

る。この手法は確かに合理性・一般性に優れているが、自然の中の現象のように、さまざまな要因が複雑に絡み合う現象を対象としたときには妥当性が問題になることが多い。これは、多数の要因相互の長期的な関連性を正確に表現することの困難さに加えて、境界条件の変化が確実に予測しえないことによるものである。この問題を解決するために、現在起こっている、また過去に生じた現象を注意深く観察し解明することの重要性が提起された。つまり、1 つの地域で自然の境界（環境）条件がどの程度の範囲で変化し、その現象を支配したメカニズムが何であり、結果としてどんなことが生じたかを把握するのである。そのうえで、実際に生じた現象を記述し、将来の環境条件（境界条件）変化として自然に起こる範囲を設定する。設定された範囲内で、種々の状態を設定すれば未来予測

[†]Natural Analogue Studies on the Long term Behaviour of Groundwater Flow in the Deep and the Shallow Underground, by Kunio Watanabe, Tatsuya Tanaka and Hiromitsu Saegusa

^{††}埼玉大学工学部 Saitama University, Faculty of Engineering

^{†††}大林組土木技術本部 Obayashi Co. Ltd., Civil Engineering Technical Division

^{††††}埼玉大学大学院 Saitama University, Faculty of Engineering

はある程度可能とある。これがナチュラルアナログの考え方の1つの説明である。このように、この方法の基本は自然現象の詳細な観察を基にした把握である。

問題は具体的に何をどのように行えばよいかという「方法論」を明確にすることである。しかしながら、この点については、まだ考えが確立しておらず、今後実際の事例研究を積み重ねていくことが大事である。本論は、そういった事例研究を、高レベル放射性廃棄物処分場の候補としての深部岩盤、および低レベル放射性廃棄物処分場としての地下浅部を対象として行い、問題点を考察したものである。

2. 深部岩盤の問題—割れ目系の変形史把握と評価—

高レベル廃棄物処分場の対象となる深部岩盤の主要な問題は、断層や節理などの割れ目系の把握と評価と考えられている。割れ目系は、もし将来活動するものであれば処分場の破壊につながることもあり、また、地下水の通りみちとなる。本論文では、対象とする岩として花崗岩など結晶質岩を取り扱う。もちろん、処分場の岩盤が地質的に新しい時代の堆積岩の場合などでは、各種堆積岩層の分布が問題となるが、その場合でも割れ目の重要性が疑われるものではない。とくに割れ目の将来的な活動の危険性の最大の問題は、図1(a)に模式的に示すような、廃棄物を収納するキャニスターの破壊である。また、(b)は、割れ目系変化に伴う岩盤内の地下水流れの変化を想定している。ここで、前者の問題について考えてみる。キャニスターは、地下深部に掘削されたトンネル底面から掘られた多数の縦穴に入れられることを想定している。割れ目変位の対策としては、キャニスターとそれを入れる縦穴の壁面との隙間（通常、ベントナイト混合土などのパUFFER材で埋められる）を大きく取っておくことが考えられる。もし、縦穴を横切る割れ目の変形が、かなり大きく、パUFFER材の厚さでは対応しきれない場合は、縦穴位置をこの割れ目位置から移動しなければならない。つまり、割れ目の変形量予

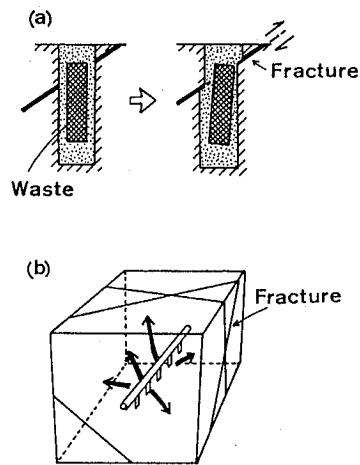


図1 岩盤割れ目系の変位に伴って想定される現象
(a)キャニスターの破壊、(b)地下水流れの変化

測は、縦穴の配置、寸法などの処分場設計に大きな影響を与えることになり極めて重要である。この割れ目変形量の予測として、現状で可能と思われるのは、対象とする割れ目が、いつ、こういった応力場で、どの程度動いたかを明らかにし、その情報を基に予測することである。つまり、割れ目1本ごとの過去の歴史を調査し把握することである。このうち、割れ目形成時の応力場は、割れ目の共役性などの形態からある程度把握しうる[1,2]。形成された割れ目の動きの歴史は割れ目相互の切り合い関係から再現することができる。図2、図3に、釜石鉱山で読み取られた割れ目の形成および変形史を示す。これらによれば、たとえば図3の割れ目は、過去に1mほどの変位を示したことがわかる。また、割れ目の交差部には、割れ目相互の切り合いによって、多数の小割れ目が形成されていくことがわかる。こういった自然現象の丹念な読み取りがナチュラルアナログの基礎となると考える。

次に生起する問題は、割れ目がいつ動いたかである。これについて、スイスでは、アルプス造山運動の歴史から推定する試みがなされている[3]。また、スウェーデンでは、割れ目内の介在物などの性質から推定する方法が取られた

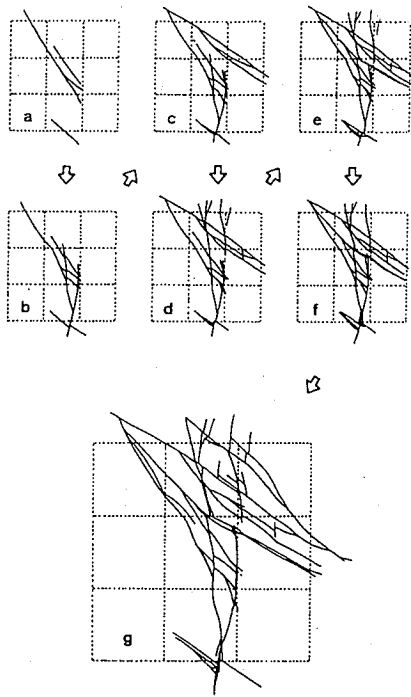


図2 釜石鉱山で読み取られた割れ目系の変形過程
破線1マスが1m 正方。

[4]。しかし、この点についてはまだ技術確立の途上であり、早急に研究を進める必要がある。

ここで述べた1本1本の割れ目の調査と評価はかなり手間がかかるし、まだ技術が確立されていない点も多い。しかし、今後技術開発を進め、また何人かの地質技術者さえ確保すれば、この方法は十分可能であるし、全体としての処分場の安全性を飛躍的に高めることができる実用的な方法と考える。

とりわけ、割れ目の活動のあり方を評価する技術の開発が重要である。現在見られる断層などの割れ目のほとんどはその活動を終了している。したがって、(1)現在活動している割れ目がなぜ動いているかといった特性を明らかにしておくこと、および、(2)個々の割れ目の活動年代を大まかではあれ推定する手法を確立しておくこと、が大事である。

3. 深部岩盤の問題—地下水の経路の把握と解析方法の開発—

岩盤内の地下水が、透水性の大きい割れ目系を主要に通過することは、よく知られた事実で

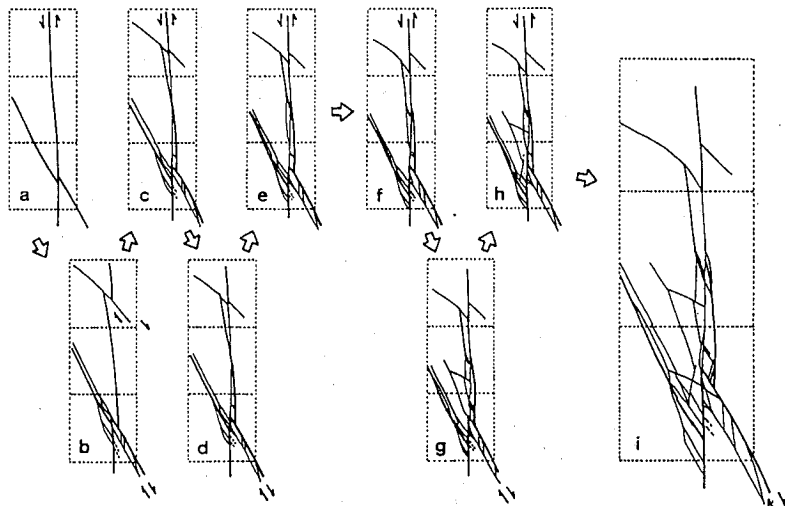


図3 割れ目交差部の変形過程
破線1マスが1m 正方。

ある。しかし、割れ目は全長にわたって一様な性質・形態を持つものではない。たとえば、上記の図3で示したように、他の割れ目との交差部に多くの割れ目を集中させる。また、単一の割れ目を見ても、最近 Mazrek ら [5] がスウェーデンのエスポ地下研究所の岩盤について報告しているように、ステップやスプレイ構造を持つことが一般的である。図4は Mazrek らの原図を簡略化したものであり、彼らは、ステップやスプレイ構造の方が割れ目の形態として一般的であるとしている。また、従来、Fracture Zone といわれていた割れ目の集中ゾーンは、局所的に発達するステップやスプレイ構造としている。また、渡辺 [6] は釜石鉱山における調査を基に、こういった考え方が日本の岩盤にも十分適用しうることを報告している。

このような割れ目形態の場所的な差によって、割れ目の中を水が一樣に流れるとは考えにくい。ではどこを通過するのであろうか。このことを考えるためには、地表付近の、いわゆる

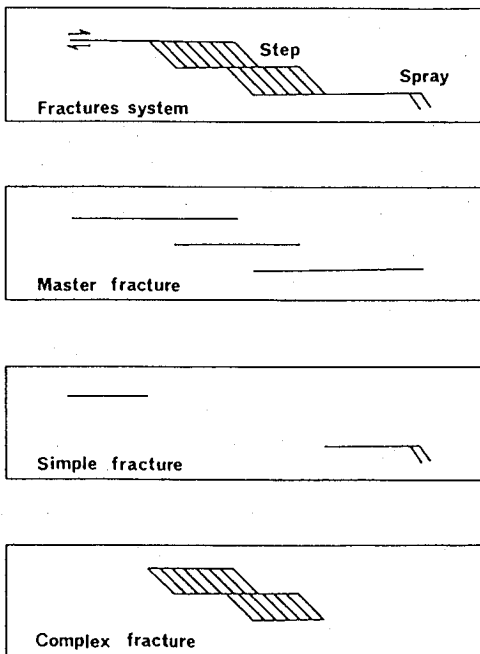


図4 単一割れ目の形状。Mazrek らの原図を簡略化したもの

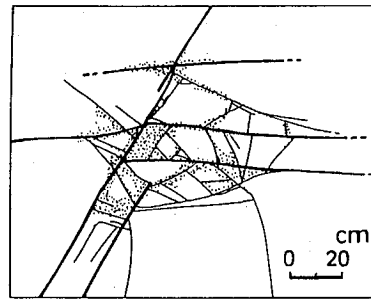


図5 風化花崗岩岩盤で見られたマサ土化部
太い実線は主要割れ目、点で示した部分が
マサ土化している。

風化岩盤の調査が適している。なぜなら、岩盤の風化過程では水の通りやすい部分から選択的に岩が変質していく性質があり、変質の進んだ部分が、概略的に水の通りみちと考えられるからである。このような調査の結果、たとえば図5に示すように、割れ目交差部を中心に花崗岩がマサ土化していることが示された。図中、太い実線はこの岩盤内の主要な割れ目を表している。点で示した部分が風化の進んだ部分である。

この他、前述のステップやスプレイ構造を持つ部分も選択的にマサ土化しやすい部分であった[7]。つまり、岩盤内の流れは割れ目系の構造に支配され、局所的な流れが多いことを示している。その主要構造を取り出す作業が解析上極めて重要となるのである。

ここで岩盤内の地下水流れ、もしくは、その流れに影響された物質の移動を解析することを考える。図6は、割れ目内流れの2つのモデルを表している。図中(a)は、割れ目内を一樣に、動水勾配方向に流れることを示している。一方(b)は、割れ目内に流れやすい水みちが存在しているモデルである。水みちとしては、割れ目交線やステップ、スプレイ構造などがあげられる。図7は、それら各モデルに対応する解析コンセプトである。(a)では、割れ目面内の流れの一樣性を表現するため、面を多数の有限要素によって分割する。一方、(b)では、流れやすい部分を管路として取り出している。どちらのモデルを採用すべきかは、当然、対象とする岩

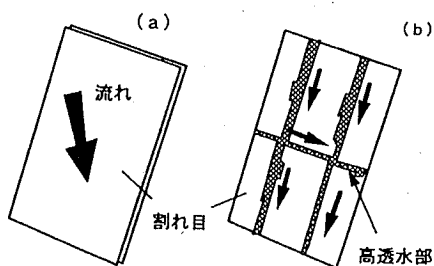


図6 割れ目内流れの模式図
(a)は面内一様流れ、(b)は高透水路を通る流れ

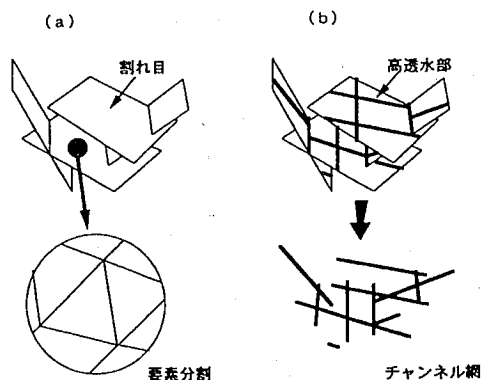


図7 解析モデルの2つの考え
(a)は一様流れの解析、(b)は水みちを取り出した解析

盤の割れ目系の性質によって決定されるべきである。このように、岩盤の調査や評価は、単に、対象岩盤の性質把握に必要であるばかりでなく、地下水流れの解析方法の選択にも関係するのである。つまり、岩盤の歴史過程を捉える作業、換言すればナチュラルアナログ的な作業なしには、妥当な解析は事実上困難であると言える。

図8は、筆者らが神岡鉱山で行った水みち把握調査の1例である。図中に示す1本の割れ目に注目し、その割れ目の持つステップ、スプレィ部や割れ目交線部を取り出している。これらの部分は小割れ目が多く水みちの候補と考えられる。この割れ目は図では曲線で示されているが、実際には多くの剪断面が集合したものである。また図中、各部の詳細構造を示している。こういった調査を綿密に行い、岩盤内の地下水の流れ経路をまず押さえることが肝要である。

なお、筆者らはこのような考えに基づき、動燃事業団と共同で岩盤内に発達する水みち系内流れを解析するコンピューター・コード (Don-Chan) を開発した。また、現在、水みち系を調査し評価する技術開発に向けた研究を行っている [1, 2]。

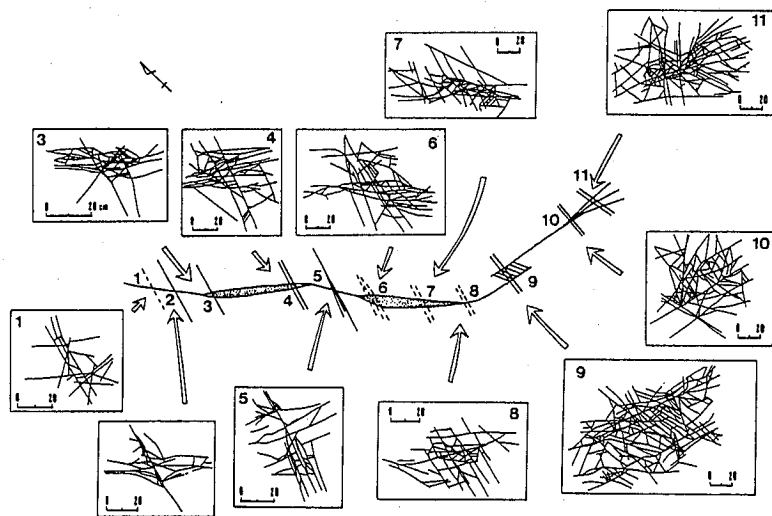


図8 神岡鉱山で見られた割れ目と小割れ目の集中部
割れ目交線部やステップ、スプレィ部に小割れ目が集中している。
小図中の単位：cm

4. 地表浅部の問題

4.1 キャピラリー・バリアーとナチュラルアナログ

地表浅部は、地下深部と違って容易に掘削でき、工学的利用がしやすい環境である。しかし、同時に、時間的に状態の変化の著しい環境であることを認識しておくことが大事である。たとえば、地表は浸食と堆積の場であり、降雨や蒸発などに伴って土壤水分などの水環境が大きく変化する場でもある。放射性廃棄物処分場として地表浅部を考える時には、実際に過去に生じた変化の歴史を十分把握しておくべきである。また、もしそれらの環境変化が、処分技術上問題であれば、変化を少なくするような工夫が必要となる。つまり、「地表付近の変化がどの程度の範囲で起こり、その結果どういう現象を引き起こすか、変化に対応する方策はあるのか」を検討しなければならないのである。これらの評価の1方法として、考古学遺物を使ったナチュラルアナログがある。

考古学的遺物、たとえば地表付近に建造される墳墓などは、まず、おおよその建造年代を把握することができる。墳墓の目的については、当時の死に対する観念を知らねばならない。しかし、副葬品の多い古墳などについては、それらの長期的な機能維持も目的の1つであったとも考えられる。もしそうであるならば、当然、土中の物質保存も墳墓建設時の設計段階で配慮されていたものと思われる。つまり、このような考古学的建造物の現在の状態を注意深く調査することによって、遺物の受けてきた地表付近の変化や、初期の土構造物設計の妥当性がどのようなものであったかを判断しうるようになる。こういった研究は、地表付近の構造物の長期安定性を評価するうえで極めて重要である。

こういった観点から、筆者らはまず、古墳内遺物の残存状態がどんな要因で決定されているかを統計的手法で調べている[8-11]。なお、ここで報告する研究対象は、埼玉県下の約100の横穴式古墳である。その方法を図9にフローチャートで示す。ここでは、その考えを簡単に示

す。まず、各古墳遺物の残存状態を評点法により定量化する。その方法は、各古墳で発見された種々の遺物、具体的には、人骨、人体組織、鉄器、銅器、木製品、繊維製品の各々の遺物種について、残存状態に評点を与え、総計する。その総計を古墳の持つ遺物残存状態、換言すれば、物質保存機能の定量値と考える。今回は、各種遺物につき、1つの地方で出土した最も残存状態の良い物に4、悪い物に1の評点を与えるように分類した。発見しえなかった場合を0とした。

もちろん、この定量評価手法は問題を多く含んでいる。まず、1つの種類の遺物が発見しえなかった場合、それがもともとなかったのか、盗難にあったのか、完全に腐食したのかが判断しえないことがある。また、4から0に分ける評点の設定は妥当かなどである。こういった問題はあるものの、大まかな定量化を目的としてこの方法を取った。次に、その残存状態を決めた要因を見つけるため、古墳の作られている場所の地質、地形などの立地環境、および古墳サイズ、古墳や石室そのものの保存状態、古墳土構造などを各古墳について整理した。

残存状態と各要因との関係を数量化理論1類を用いて把握した。その結果、すでに報告しているように、残存状態には、(1)古墳および石室そのものの堅牢性、(2)石室周りの低水分状

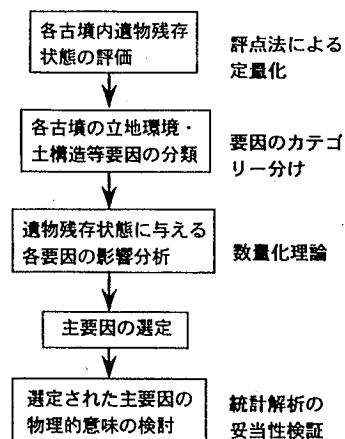


図9 古墳遺物情報の解析フロー・チャート

態、の2つが重要であることが示された。とくに水分状態については、河岸段丘など水の浸透性が大きく、地形的に高い場所や、石室周りを毛管力の小さい礫層などで覆うことがより有利な要因として選出された。とくに、石室周りを毛管力の小さな層で覆うことは、一般的な古墳の作られる不飽和帯の水制御の1つであり、最近低レベル放射性廃棄物処分技術として取り上げられている、キャピラリー・バリアーの考えである。図10(a)は、アメリカで提案された廃棄物処分場構造である[12]。廃棄物周辺を粗粒層で覆う構造となっている。また、図10(b)は、古墳の解析から筆者らが提案した構造である。土の層状構造を作り、とくに毛管力の小さい層を使って廃棄物周辺の水分状態を低下させる点で、これら2つは基本的に同じ設計思想である。

もちろん、前述したように、この手法には統計解析に用いたデータに関して多くの問題を抱えている。しかし、キャピラリー・バリアーという極めて合理的な水分状態制御の技術に結果として結びついた点は、概略的な解析として評価しうる。また、キャピラリー・バリアーの技術が、不飽和帯中では長期的にかなり安定した

機能を示すことを、ある程度示したものと考えられる。

4.2 結露防止のナチュラルアナログ

地下の水分環境を考えるうえで、極めて重要な現象が結露である。これは、空気中の水分移動であり、これを止めることは技術的に容易ではない。地下の空間内に生ずる結露は、その空間内の金属などの腐食を促進し、物質保存を考えるうえで避けるべきものである。閉じられた空間の中で、空気中の水分総量は一定でなければならぬ。そのため、結露が生ずるためには、必ず、空間中のどこかから水分が供給されていなければならない。空気水分の供給は、蒸発により行われる。つまり、地下の閉鎖空間を考えた時、蒸発量と結露量はバランスしている必要がある。蒸発と結露が生ずる理由は、空間内の温度に差があることである。地表の気温や地表から浸透する雨水の温度が季節的に変化するため、地下浅部に作られる空間内には温度の差が作られ、その結果、蒸発と結露が生ずることになる。

では、結露量はどの程度になるであろうか。地下空間の例として古墳石室を取り上げ、実際に測定した[13]。測定は、筆者らが開発した蒸発計により行い、岐阜県池田町願成寺西墳古墳群43号墳で冬季行った。石室内31点の測定結果をまとめたものを図11に示す。図では、結露をマイナス値で示している。これから、結露量と蒸発量がほぼバランスしていることがわかる。また、結露量のみ平均値はほぼ $1 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ となる。なお、その時の水分移動を石室断面内で模式的に示したものが図12である。結露量 $1 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ は、年間では降雨換算で 3.1 cm となり、1000年間では 31 m と極めて大きな量となる。もちろん、石室内の温度分布は季節変動しており、この量が同じ場所で続くものではないが、結露量が決して無視しうるものではないことを示している。なお、筆者らは、蒸発量と結露量を数値解析する方法を提案している。また、藤ノ木古墳などでは、石棺内に水が溜まっていることが報告されているが、この水は、結露か

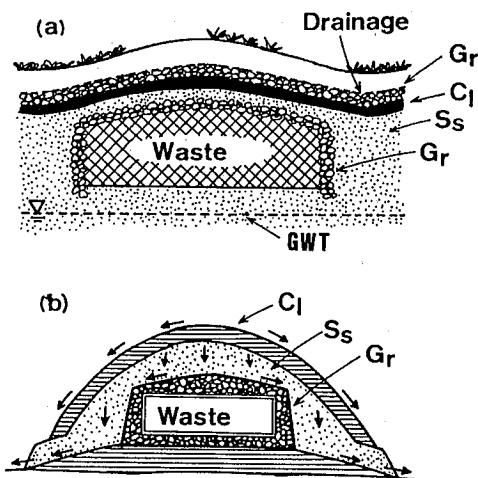


図10 キャピラリー・バリアーを用いた廃棄物処分場構造の考え
Gr: 礫層、Cl: 粘土層、Ss: 砂層

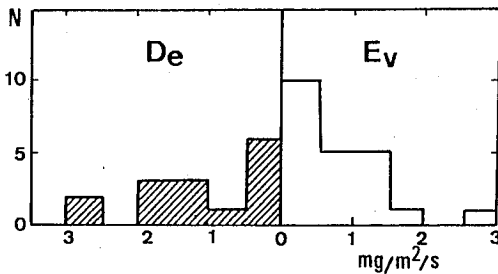


図 11 測定された蒸発・結露量分布
Ev: 蒸発量、De: 結露量、N: 測定点数

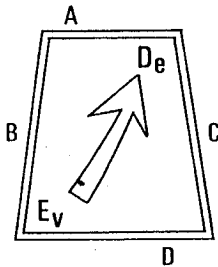


図 12 古墳石室断面内の空気中水分移動模式図
A、B、C、D は石室面、Ev: 蒸発、De: 結露

らもたらされたものと考えている。

問題は、過去にこの結露を防止する方法が取られていたか、もし取られていたとしたら、その効果はどの程度機能したかを検討することである。少なくとも、前述の古墳の例ではかなり大量の結露が観測されており、もし結露防止が取られていたとしても、現在その効果はほとんどないと言える。結露防止策については、今のところその技術を読み取るに至っていない。その理由の1つは、古墳築造年代が古く、その情報が読み取れないことである。そのため、地下の長期的物質保存を目的とした新しい時代の地下構造物について考えることとした。その構造物として取り上げたのが、江戸時代末期から明治時代にかけて作られた即身仏入定窟である。即身仏は日本で作られたミイラである。この製法は極めて特殊であり、あえて水分の多い地中の小さな空間でミイラ化することを考えるとい

う不合理な方法である。したがって、この方法を取る以上、さまざまな技術が使われ、その1つとして、結露防止などの地下水分制御法があったと考え、多くの入定窟を調べた。たとえば、新潟県村上市の観音寺には、明治35年に入定され、昭和35年に発掘された仏海上人入定窟が保存されている。またこの入定窟を作るに当たっての検討が情報として残っている[14]。その中で、入定窟の地下深度についてとくに注意が払われ、深さ1丈とかなり深い位置を目安としたことが伝えられている。深度を大きくすることは、地下水学的にみて背反する長所・短所がある。まず、深度を大きくすることは、地下水面に近くなり、入定窟への地下水浸入の可能性を大きくすることがある。一方、深度が大きくなれば、地温が一定し、結露発生が押さえられることが期待しうる。

地温の問題を考えるため、土壌のサンプルを採取し、まず土壌の不飽和透水特性を筆者らが提案している逆推定法[15]により求めた。次いで、熱伝導率と飽和度との関係を松本ら[16]、粕淵[17]の研究を基に実験的に求めた。これらの値を使って、図13に示す簡単な境界条件の元に、1次元の熱・浸透逐次連成解析により深さ方向の年間地温変化を計算した。計算では、領域上下面の温度を一定とし、上面(地表面)温度を季節変動させた。また、降雨浸透による熱移動を考慮するため、地表面温度と同じ温度の降雨浸透を与えた。降雨浸透量は月平均降雨の1/3とした。年間の地温分布の変化を図14に示す。また図15は、深度方向の、1m当たりの温度勾配分布を示す。これらの結果、地下3~4m以深で温度がかなり安定していることがわかる。これは結露発生防止に良い効果を与える。

しかし、前述したように、深度が大きくなることは、地下水面に近くなることを意味し、地下水の浸入の危険性を増大させることにつながる。そのため、この入定窟では、入定窟の底面付近に鉄棒を設け、その上に仏界上人の遺体を入れた棺を乗せ、浸入した地下水が遺体に接触することを防止している。

この他、たとえば酒田市の海向寺境内の入定

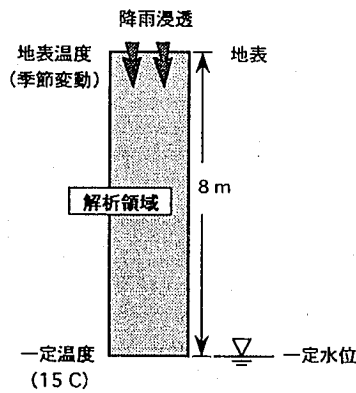


図13 解析境界条件

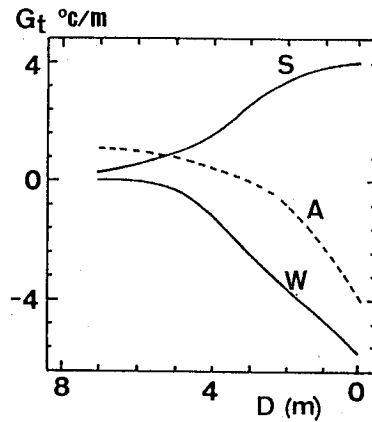


図15 地温勾配分布の解析結果
S: 夏、A: 秋、W: 冬、Gt: 地温勾配

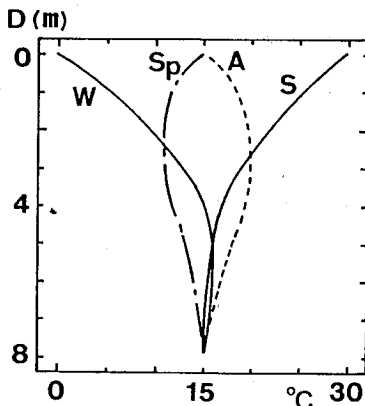


図14 地温分布の解析結果
Sp: 春、S: 夏、A: 秋、W: 冬、D: 深度

地は砂質土の崖の近傍にある。これは、地下水の浸入を避けたものと考えられる。このように、地下空間での長期的な「一種の物質保存」を考えて、地下水浸入や結露防止を行ったと推定される方法が取られている。もちろん、これらのように保存された例ばかりでないことも想定されるが、少なくともいろいろな技術が考え出され、その一部は初期の目標を達成しえたと言える。このように、ナチュラルアナログ手法は、実際に発生する可能性のある現象とその防止技術の効果を検討するうえで重要なものであると言える。

5.まとめ

今回、地下で起こる物理現象のナチュラルアナログ的検討の例を示した。高レベル放射性廃棄物処分の対象となる地下深部については、割れ目形成の歴史を把握することの重要性とその把握プロセスを述べた。また、割れ目形成プロセス把握をベースとした地下水解析の考えに言及した。地下浅部については、考古学的なナチュラルアナログが有効であることを述べ、古墳や即身仏入定窟を用いた筆者らの研究例を紹介した。

しかしながら、ナチュラルアナログの研究、とくに物理現象を用いたナチュラルアナログはまだその端緒にすぎたばかりである。今後、多くの事例研究が積み重ねられることが必要である。ただ、その研究の中で必要なのは、自然のあり方を深く見つめる視点である。自然現象を深く洞察することによって、将来起こりうる現象が把握しえ、現在考えられている技術の長期的な機能が評価しうると考える。

6.参考文献

- [1] 田中達也 他: 応用地質、35、104(1994).
- [2] 渡辺邦夫 他: 応用地質、35、132(1995).
- [3] Bossart, P. and Mazurec, M.: TR 91-12, NAGRA, 55 p(1991).

- [4] Munier, R.: *Engineering Geology*, **33**, 159(1993).
- [5] Mazurek, M. et al.: Progress Report 25-95-03, SKB, 73 p(1995).
- [6] 渡辺邦夫: 土と基礎 (地盤工学会) **43**, 1 (1995).
- [7] 杉村淑人 他: 第27回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、1996 (印刷中).
- [8] 渡辺邦夫: 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム、pp. 317-326(1987).
- [9] Watanabe, K.: *Proc. 1989 Joint Int. Waste Management Conf.*, 567(1989).
- [10] Watanabe, K. et al.: *1991 Joint Int. Waste Management Conf.*, 133, (1991).
- [11] 渡辺邦夫: 地中の虹、近未来社、184 p (1993).
- [12] O'donnell, E. et al.: *Proc. DOE Oak Ridge Model Conf.* (1987).
- [13] 渡辺邦夫 他: 応用地質、**33**, 23(1992).
- [14] 佐野文哉、内藤正敏: 日本の即身仏、光風社書店、208 p(1969).
- [15] 堤和大 他: 応用地質、**35**, 69(1994).
- [16] 松本順一、大久保俊治: 土木学会論文報告集、no. 257, 53(1977).
- [17] 粕淵辰昭: 土壌の熱伝導に関する研究、農業技術研究所報告、B 33、52(1982).