

社会工学入門 - 人類と地下

北海道大学大学院工学研究科岩盤力学分野 石島 洋二

0. はじめに

植生が繁茂している地表、あるいは海底や湖底は土や泥で覆われているが、それらの厚さは通常は数メートル程度に過ぎず、その下は数十 km まで岩盤である。この領域は地表の下にあるので地下空間と呼ばれる。地下空間は地表に比べて広大である。ここには地下水や鉱石から成る鉱床、あるいは石炭や石油・天然ガスなどの地下資源があり、人類は誕生と同時に地下資源の恩恵を受け、それ以来、ずっと受け続け、現在に至っている。

地下空間は地殻の上部の人類との関わりの大きい領域を指す。地下空間は地殻全体から見るとごく一部であり、地殻自体が地球全体から見るとほんの薄皮にしか過ぎない。しかし、21 世紀の間に地下空間が広がることはないと思像される。なぜならば、地下空間は人類が誕生してから現在に至るまでほとんど手付かづの状態に残っているからである。

地下空間に賦存する地下資源は有用であるが、実は、我々人類が地殻から受ける恩恵はそれだけではない。人類の生存を脅かす環境問題は、地殻を多角的に利用することでのみ解決可能になると考えられる。この内容を2回の講義で概説する。第1回目の講義では、人類が地下からどのような恩恵を受けてきたか、また受け続けているかを紹介する。

1. 材料や原料を供給する場としての地下

1.1 石器時代

我々現生人類の直接の祖先は、アフリカ・エチオピアの大地溝帯から世界各地へと旅立ったとされている。2本足で歩行し、また、既に火の利用を知っており素朴ながら石器などの道具を使っていたらしい。人類はこの技術を開発したために、他の動物に対する優位性を保ち、住む範囲を地球上の隅々にまで拡げることができた。このように人類は最初から道具を使える技能を持った種であったようである。

人類が誕生して以来、人類が獲得した技術レベルは、連続的というよりは段階的に向上している(飛躍と停滞の繰り返しという人もいる)。石器の加工技術と広範な使用は最初の milestone である。だからこそ、この時代は石器時代と呼ばれているわけである。石器時代は人類史の 99% を占めている。石器はもちろん、地下を構成する材料であるので、広い意味で地下を利用したといえる。実は、人類の現在までの技術的な milestone は、全て地下資源と密接に関係している。

地下を構成する主要材料である岩石には様々な種類があるが、特に硬い岩石は、必ず割れ目を含んでいる。このために、岩石は割れ目に沿って分離し、風化や侵食などの過程を経て、いわゆ

る石ころになる。硬い岩石は木の実を割るのに有用である。また、硬く鋭い岩石は、動物の皮膚を裂き、肉を取り出すのに利用できる。石を武器として使えば、人間を餌とした動物も逆に餌にすることができる。石器を利用することで、食料の種類と量が増えていった。

岩石を加工する技術は徐々に進歩し、石器と棒(槍、矢)、石器とひも(遠投用武器)などの組み合わせた道具も出現した。材料も種々のものが使用されるようになったが、これらの中には自然銅や砂金なども含まれる。これらの使用は金属を発明する下地になった。

岩石の一部は大量に使用され、交易によって生産地の遠方でも使われた。火打石(flint 石、燧石)、黒曜石、岩塩、ヒスイ、瑪瑙などが代表例である。火打石は、火を起こす道具として携帯も可能であり、日本でも明治の頃までは実用品であった。天然のガラスである黒曜石は鋭い刃面が容易に得ることができ、矢じりなどに使われた。これらは採石場で大量に採掘した。

現在でも石灰岩(セメントの原料)、硬岩(コンクリート骨材の原料)、建材(大理石や凝灰岩)、岩塩は採掘が続いている。

1.2 金属の文化

人類の技術的な発展過程における第2の milestone は金属の生産である。すべての金属は地下に鉱床として存在する。それを鉱石として採掘し、選鉱・精錬を経て金属になる。

金属は、均質、延性、硬度などを備えており優れた材料である。このことは、自動車、船、機械などといった複雑で精密な加工が必要で同時に耐久性が要求される構造物の主要部分が金属材料でできていることから理解することができよう。金属はそれが発明された初期の段階においては専ら武器や狩の材料として使われた。金属を使うと切ったり刺したりするために理想的な形状の武器が製作でき、金属製の武器を持たない者や動物を圧倒することが可能になる。また、農耕の道具としても優れ、食料の生産増加に寄与する。古代文明という人類で最初の大規模な人間の集団社会の出現と金属の出現がほぼ同時であるのは興味深い。

最初に大量に生産された金属は青銅(銅と錫の合金)である。融点が単体の銅や錫よりも低いので生産が容易であったのであろう(どうやって青銅を発明したのかについての詳細は不明である)。精錬は基本的には火と窯があれば可能である。

既に、古代中国や古代エジプトでは 3000 年前に銅鉱山が開発されていた。

鉄の発明は銅や青銅の発明より遅れたが、鉱床が豊富であり、強度も優れているために、最も重要な金属になった。

金は変質せずに美しさを保ち希少価値がある。装飾品の他に、汎用性のある交易の材料(貨幣)として優れている。金の出現は交易の範囲を拡げるなど人類の商業活動を活発化する上で寄与した。豊臣秀吉や徳川家康は武力で他を圧倒するとすぐに主要な金・銀鉱山を直轄にしたのは、当時から金は目減りしない財産としての価値があることを示唆している。

現代は第二石器時代といわれている。シリコン(Si)は電子産業の米、水晶(SiO₂)は電子産業の塩と呼ばれる。これらは電子部品の基盤や発振子など半導体の材料として多方面で大量に使われ、情報化社会を支えている。

1.3 燃える石・燃える水

第3の milestone は、今から約 250 年前に始まった産業革命である。産業革命の工学的な側面は、エネルギー(石炭)の大量使用による金属(主に鉄)の大量生産と石炭エネルギーを用いた動力機械の発明である。布を織る動力機械はその生産量を飛躍的に増加させ、運搬の動力機械(蒸気機関車)は運搬量の増加と運搬速度の増加をもたらした。これらはそれまで社会のしくみを一変させる効果があった。

初期の動力機械に続いて、自動車、飛行機などの運搬機械や生産機械が次々に発明された。

石油や石炭・天然ガスなどのいわゆる化石燃料は、もちろん地下資源である。これらは昔の植物や動物の炭素分あるいは脂肪分が濃集したものであるために化石燃料と呼ばれる。

人類が消費するエネルギーは産業革命を契機として、急激に増加し現在に至っている。アメリカ合衆国が典型例で、この国の繁栄はエネルギーの大量消費によってもたらされたものである。わが国でも膨大な量のエネルギーを使用している。発電の 85%が化石燃料、12%がウラン燃料(原子力発電)、残りの 3%が水力と地熱などで賄われている。原子力発電の燃料であるウランもウラン鉱床から採掘し、精製したものである。こうしてみると、わが国のエネルギーの実に 97%は地下資源に頼っていることがわかる。わが国の石炭の消費量は伸びつつあるが、国内の炭鉱がほとんど消えてしまった現在、殆ど全量を海外から輸入していることを忘れてはならない(平成 14 年度時点でわが国の石炭消費量は 1.5 億トンに達する)。

1.4 枯渇しつつある地下資源と新たな資源の開発

現在、地表近くの地下資源は次第に掘り尽くされ、採掘現場は深部に向かっている。インドと南アフリカの金鉱山やダイヤモンド鉱山では、採掘深度が 3.6km に達している。わが国における石油や天然ガスの採掘深度は 5km を超えるものが現れている。

低品位の地下資源はコストの面から採掘という形では回収できないが、微生物を使って銅を回収する技術、低品位の炭層から地下ガス化という技術を使ってメタンガスを回収する技術が実用化されている。

新しい地下資源を見出すための探査も必死で行われている。数年前に苫小牧 - 千歳に賦存する有望なガス田が発見され、現在、札幌に都市ガスとして供給されている。新潟県でもガスの生産が増加している。これらのガスは、従来、予想もしなかった地層に賦存している。苫小牧の場合には花崗岩、新潟の場合は凝灰岩であり、これらの割れ目にガスが貯留している。今後、新たな天然ガスの発見が相次ぐと予想される。技術的に重要なのは、これらの天然ガスは地下 5km 前後の深部に賦存していることである。わが国の技術水準は 5km までの掘削を問題なく実施できるレベルに到達している。

北海道には地下 3000 ~ 4000m に大量の良質な炭層が眠っている。地表下 1500m 以深に賦存する炭層は現在の技術をもってしては採掘することができない。炭層には、coal bed methane と呼

ばれるメタンガスが含まれているが、やっかいな炭酸ガスと交換するという形でメタンガスを回収する技術が開発されようとしている。

メタンガスハイドレードは日本近海に分布し、今後有望なエネルギー源になると期待され、その採掘方法が研究されている。

マグマが地表近くまで上昇し地熱の高い領域が本州の背骨に沿って分布している。現在は、一部が地熱発電や温室栽培に利用されているだけであり、この本格的開発・利用は今後に残されている。

バイオマスや風力発電に代表されるような**新エネルギー**の探索が今後も行われるであろう。

2. 岩石を使った構造物とその建設方法

2.1 岩石を使った構造物の特徴

石器時代の後半には、石柱やモニュメント、墓、石造建築物などが各民族によって作られ始め、それは、現在に至るまで続いている。古代に建設された石の建造物が現在に至るまで残っているものが世界中にみられる。これは岩石が耐久性、隔離性、美しさなどに優れ、かつ大量に入手し得るという背景があるためである。

岩石に敵う人工材料は開発されていない。コンクリートはせいぜい 10^2 年の寿命しかない。現在の大型・高層建築物を構成する主要な材料は鉄筋コンクリートであるが、100 年後まで存続するものはないであろう。これに対して、石造りの建築物は(地震がなければ) 10^3 年は楽に維持することができる。オランダの堤防は岩石を用いていることは象徴的である。硬い地下岩盤に設けた空洞は 10^4 年以上の寿命があることは、風化にさらされる地表近傍の空洞がその程度の期間、自立していることから確実と考えられる。

岩石を建材とする建築物は、内部に空間を作り出すためにアーチ構造を採用するのが普通である。アーチは、岩石が引張には弱いですが圧縮には強いという性質を利用した理に適った構造である(人間の体にもアーチ構造がある)。

地下に空間を作ると、いずれはアーチを形成して安定する。トンネルの断面がアーチになっているのは、力学的に合理的な形状であるといえる。

北欧(スカンジナビア半島の3国)では、種々の目的を持った岩盤構造物が数多く建設されている。硬岩が多いこと、寒冷地であることなどが、背景になっている。

2.2 地下空間の建設を可能にする技術

物質の密度が極めて薄い宇宙空間であれば、ロケットはその中を1日に何万 km も飛ぶことができる。しかし、現在までに人類が到達できた深度は 12km である。地下空間を開発するためには密に詰まった岩石を壊し取り除く、つまり掘削しなければならないが、掘削には高度の技術と費用が

要求される。

花崗岩のように硬い岩石でも掘削可能な磨耗しにくい歯先(ビット)の開発、マグマのような高温条件の下でも掘削可能な歯先(ビット)の開発、超深度のボーリング技術、地下資源の探査技術の高度化などが求められている。

地下空間の建設は、強度のある岩盤の方が容易であり、崩れやすく弱い岩盤は容易でないことは想像できるであろう。わが国では、東京・大阪の例からわかるように、都市の多くが厚く泥や砂が堆積しているために地盤が弱い場所に形成されている。このように弱い地盤内に地下鉄用トンネルなどを安全かつ能率的に建設するには高い技術力が要求される。ここでは、日本で発達した施工技術を紹介する。

シールド機械という円筒形の形をした掘削機械がある。この機械の前面には回転する鋼鉄製の円盤がついている。円盤は回転し、前面に付いている歯で地盤を削る。削る際に、地層の空隙を満たす水が動かないように(水が抜けると、その分、地表が沈下する)、地下水圧に等しい水圧を加えながら掘削する。掘削した泥状の土砂はバキュームで吸い取り、地表に運ぶ。掘削しながら、形成された空間に前面の回転円盤を押し付け、その後、機械の後部を引き寄せる。すると機械の後部には空間ができるので、セグメントと呼ぶコンクリート板を組み立て円筒形の支え(ライニング)を作る。これが周囲の地盤を支える。こうしてシールド機械が前進した後は、がっちりとしたコンクリートの壁(ライニング)で覆われたトンネルができる。世界中でシールド機械の8割以上は日本で使われている。ドーバー海峡の海底は柔らかい岩盤でできているが、ここにトンネルを掘削した機械は日本製である。このことから理解されるように、シールド機械の性能と生産量は断然世界一である。

現在は、立坑を掘削し、坑底からそのまま水平にトンネルを掘削するシールド機械まで出現している。これは、モグラやミミズのように地中を自由自在に掘削できることを意味する。この機械の開発の指導的役割をした金子研一は当学科の卒業生であるが、彼はこの功績によって恩賜賞を授与された。

シールド機械は基本的には円柱状のトンネルしか掘削できないが、これを用い大型球面に沿ってスパイラル状にトンネルを掘削しつつ壁と構築し、その後、壁に囲まれた内部を掘削して取り除けば球形空洞が得られる。