

社会工学入門Ⅱ－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

本原稿には 2002.4.11 に実施した講義の内容が示されている。興味を引いたトピックスについては参考文献 (home page) を参照しなさい。

1. 人類と地下資源

1.1 人類の誕生から産業革命まで

我々人類の直接の祖先は森で生まれ、森から草原へと冒険に旅立ったとされている。このとき2本足で歩行したようである。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。これらの技術があったために、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広げることができた。このように人類は最初から道具を使える技術を持った種であったようであるが、現在に至るまでの過程には、以下に述べるように、技術的進歩に関して幾つかの milestone がある。これらの milestone は、地下資源と密接な関係のあることがわかるであろう。

最初の milestone は石器の加工技術の進歩であろう。石器の加工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、自然銅や自然金などは金属の発明の下地になった。火を起こす道具にはいくつか種類があるが、その中で携帯に便利な火打石は、日本でも明治の頃までは実用品であった。採石場で大量に採掘した火打石 (flint 石(1)) や黒曜石、ヒスイ、瑪瑙などは交易の材料となった。

人類の技術的な発展過程における次の milestone は金属の発明(2)である。鉱石から精錬を経て得られる金属は、均質で延性と硬度を兼備した優れた材料である。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。金属は古代文明という人類で最初の大規模な人間の集団社会をもたらした。

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があれば可能である。いずれにしても、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。

第3の milestone は産業革命(3)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。これに伴い石炭に加えて、石油の消費量が増えた。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。

1.2 エネルギーや資源を大量に消費する現代

人類が消費するエネルギー(4)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、現在は膨大な量のエネルギーを使用しているが、エネルギー源の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。

現代社会を支えるあらゆる金属やコンクリートの原料は地下に賦存している。現在の快適な生活は地下資源の消費の上に成り立っているといえる。

現在、地表近くの地下資源は次第に掘り尽くされ、採掘区域は深部に向かっている。インドと南アフリカの金鉱山では、採掘深度が3.6kmに達している。石油の採掘深度は5kmを超えるものが現れている。

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。数年前に苫小牧一千歳に賦存する有望なガス田が発見され、現在、札幌における都市ガスの供給源になっている。メタンガスハイドレード(5)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ている。札幌市の地下3000~4000mには炭層が眠っているが、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。しかし、coal bed methane と呼ばれる炭層に含まれるメタンガスは採取が可能になりつつある。それも、後述するように廃棄物の炭酸ガスと交換するという形で。

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。

現代の人類に不可欠の地下資源を確保するために、深部の鉱床を安全・経済的に採掘する技術の開発、超深度のボーリング技術、マグマのような高温でも掘削可能な歯先(ビット)の開発、地

下資源の探査技術の高度化などが求められている。

1.3 人類の生存が怪しくなり始めた現代

現在の快適な生活はエネルギーや資源の大量消費によって賄われている。しかも人工は爆発的に増加しているので、消費量も加速度的に増加している。エネルギーの拠り所である地下資源は有限であり、このままいけば、枯渇するのは目にみえている。今から 4000 年前に栄えたミノス島のクレタ文明やイースター島の巨像文明の衰退(7)は、木材の消費による森林の消滅に起因しているとされている。このように、資源の枯渇による文明の衰退については既にいくつか前例がある。

エネルギーや資源の大量消費は、ゴミの大量発生を伴う。これは、大気や地下水の汚染、地球温暖化、海面上昇、砂漠の拡大、オゾン層の破壊などさまざまな負の効果をもたらしている。ごみの一部はリサイクル技術により資源としての利用が可能であるが、完全に利用しつくすことは不可能であり、fly ash などの廃棄処分すべきゴミが残る。極めて厄介なゴミの一つに原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物がある。この毒性は数千年というオーダーで持続する。現在、日本の原子力発電所はこの極めて危険なゴミを抱えてウロウロしている。

ゴミの問題は社会的な側面を考慮しなければならないので解決は単純ではない。これは人口が密集した都市において先鋭的に現れている。都市を構成する住民は、快適さの追求には賛成するが、その産物であるゴミの後始末を身近とするのは反対である。

- ・道路や墓地の建設反対
- ・ゴミ処理工場やゴミ処分場反対

といったニュースが連日賑わいをみせている。

エネルギーと資源の大量消費は、人類の生存すら危うくするととても大きくかつ複雑な問題をもたらしている。われわれ人類は、種の終焉に至るのか、あるいは問題を解決して生き永らえるのかという重大な岐路に立っている。もし解決策が見出せるならば、そのための技術は人類の進展における第4の milestone となるであろう。

2. 地下空間の利用—人類の生存をかけて

限られた平面内に建物が立て込み人口密度の大きい都市では、ゴミの問題を「空き地に捨てる」という方法で解決することはできない。「取り出したものは元の所に返す」というのは自然なやり方である。地下資源の利用カスは地下に戻すという考えは合理的であろう。

こうしてみると都市においては、「ゴミをはじめとする様々な問題を3次元空間の場において、すなわち地下空間の導入という形で検討する」ことは考慮に値し、しばしば有効な解決策が得られる。

例えば、東京の環状道路における未工事部分の問題については、残りの道路を地下にもってくれば解決するであろう。扇大臣も地下にしたらという提案をしている。神田川では洪水調整池を地下に設置した(巨大なトンネルを建設した)。今後、この川では洪水で悩むことはないであろう。下

水道に光ケーブルや電線を通し、総合的なネットワークを建設する作業が始まっている。

東京の近郊都市では、ごみ処理場を地下に設置する検討を始めている。危険な都市ガスのタンクや石油タンクの地下移行も進むであろう。

都市部における地下空間は、都心でもほとんど手付かづの状態になっているために、その開発を合理的かつ迅速に進めることができる。これ可能にする法的整備が平成 13 年になされた(従来は地主の権利は地球の中心までであったが 40m に制限された)。

炭酸ガスを石油・ガス・石炭の採掘跡(元の地層はすかさずの状態になっている)に埋設することが検討されている。採掘跡の容量はかなり大きい上に、ある程度の圧力をかけても問題ないので(地圧と水圧が封じ込めてくれる)、相当量の炭酸ガスを埋設することが可能である。この処分法には、楽しみがある。埋設後、炭酸ガスが可燃性ガスに変ると期待である。原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物は、自国の地下深部に埋設する地層処分がもっとも優れた方法であることが、現時点では世界的な合意になっている。わが国でも 2030 年頃から地層処分を実施する計画になっている。既にアメリカでは低レベル放射性廃棄物の地層処分が実施されている(8)。

3. 地下はどうなっているのか

地下は今後の開発が待たれるフロンティア領域である。今後、さまざまな目的で地下の開発が進められるであろう。そのためには地下に関する情報を集め、地下の特性を正確に知っておく必要がある。地下は、硬いものからほとんど土に近い軟弱なものまで様々の種類のある岩盤から構成されている。この岩盤は地球表面を覆い厚さが数 10km～100km のプレート(plate)と呼ばれる板の主要な構成材料になっている。今後開発の対象となる領域は、地下 1km 前後までである。したがってどこまで地下に潜っても岩盤が続いていると考えてよい。

欲が深い人類が地下の開発深度を 1km までに限定しているのはなぜであろうか？それは入れないためである。

3.1 深部開発を妨げる地下の状態

地下岩盤には水圧と同様に地圧と呼ばれる圧力(応力)が生じている。岩盤は固体なので、過去に受けた様々な力の影響を記憶しており、場所によって力学的な状態が異なる(水は静水圧状態しかとり得ない)。わが国では岩盤内に生じている力は総じて東西方向が大きい。岩盤に生じている力の中で、鉛直成分は静水圧と同様に深度に比例して大きくなる。1000m の深度では 1cm^2 に 2500N の力が作用している。ここに空洞を作ると、空洞にかかって存在していた岩盤の負担していた力を周囲が肩代わりすることになるので、大きな力が作用する。材料に大きな力が作用すると耐え切れずに破壊する。したがって、地下深部に空洞を作ろうとすれば破壊と戦わなければならない。

地下は地表よりも温度が高く、しかも季節によらず一定している。地下岩盤の温度、すなわち地温は深くなるにつれて確実に増加する。つまり、地温は 100m 下がると 3～5℃上昇する。2000m では 60～100℃になる。地温も人類が地下深部に進出する妨げになることが理解されるであろう。

ヒートポンプ(6)によって地温を室内気温の制御に利用する技術が進んでいる。また、寒冷地においては地表と地下の温度差が大きいことを利用し、熱サイフォンによる発電が考えられている。

3.2 地下岩盤の利点

岩盤の中には水やガスを通しにくい性質が強いものがある。塩が固まった岩塩や、泥が固まった泥岩はその典型例である。泥岩の層の下には、しばしば石油やガスが溜まっている。これは泥岩が万年のオーダーで石油やガスの漏れを防ぐ能力のあることを意味する。炭酸ガスや危険な廃棄物を泥岩の下に埋めると、その悪影響が人間界から長期に亘って隔離されることは容易に理解されよう。

地震は岩盤(あるいは岩盤に入っている割れ目、つまり断層)の破壊現象で、もちろん、地下深部で発生する。地下は地震の発生源に近いので地表よりも揺れるだろうと思うであろうが、実際はその逆である。阪神大震災のとき地下鉄や地下街の被害が少なかったことは、これが事実であることを実証した。

硬岩から出来た岩盤は、いってみれば天然の強いコンクリートが数 km 四方に広がっているようなものである。しかも岩盤には地圧というプリストレス(pre-stress)が作用している。この利点を生かすと、大空洞を建設しその中に石油やガスを安全かつ大量に溜めることができる。砂川には 750m の長大落下タワーが建設されている。もちろん地下に立坑という形で。

岩盤の遮蔽性は宇宙線に対しても発揮され、大部分の宇宙線がカットされる。これを利用して原子を構成する素粒子である陽子の寿命を測る研究施設が地下深部に建設されている。

地下岩盤にはその隙間にバクテリア(恐らくは)が地表と同じ程度の密度で分布していることをご存知であろうか。地下は還元環境になっているので、嫌気性のバクテリアが多いと考えられるが、その中には、原始地球の時代から生き延びているバクテリアも含まれているはずである。

4. 地下空間はどのように造るのか

地下空間の施工は、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やゴミ処理工場を収める空洞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(9)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(動く、地下水の分布に擾乱が起き、地表が沈下する)、地下水圧に等しい水圧を掛けながら掘削する。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。ドーバー海峡トンネルを掘削した機械は日本製である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。

5. 地球システム

現在はエネルギー使用の極限状態に達しており、人類は滅亡の一步手前に立っている。この問題解決に地下空間が重要な役目を果たし得ることを述べた。

しかしながら我々に残された唯一の処女空間である地下空間の開発は慎重に進めるべきである。20年前にアメリカで地下深部に達するボーリング孔を掘削し、ここに高放射性廃液を投棄したところ地震が発生した。これは岩盤の破壊が起こったためである(岩盤に水圧を加えると強度が低下する)。

かけがえのない地球を住み易くするためには、エネルギー・資源の使用とゴミ処理を繋ぐサイクルのシステム化を地球規模で進める必要がある。われわれ資源開発工学科では、地球システムという観点から、従来培った地下開発技術を発展させ、地下資源の採掘のみならず、地下空間の新たな利用に向けた研究開発をしている。

参考資料

- (1)火打石: <http://www.edu.city.yokosuka.kanagawa.jp/0kyo/1kyo/a11.html>
- (2)金属の発明: <http://www.sendai.kopas.co.jp/METAL/museum/exhibition.html>
- (3)産業革命: <http://www.sekaishi.com/mailmag/sekamo/91.html>
- (4)エネルギーの消費量: <http://www-atm.jst.go.jp/pesco/ENERGY/KURASI4.HTM>
- (5)メタンガスハイドレード: http://www.jnoc.go.jp/c_methane/methane_mokuji.html
- (6)ヒートポンプ: <http://www.geothermal.co.jp/>
- (7)古代文明衰退の原因: <http://www.saga-ed.go.jp/materials/edq01439/kankyoku/kodai.html>
- (8)放射性廃棄物の地層処分: <http://www.wipp.carlsbad.nm.us>
- (9)シールド機械: <http://www.jrcc.go.jp/gijutu/index.html>